MANUAL BRASILEIRO DE SINALIZAÇÃO DE TRÂNSITO
VOLUME V – SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. APRESENTAÇÃO

O **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**, elaborado pela Câmara Temática de Engenharia de Tráfego, da Sinalização e da Via, abrange todas as sinalizações, dispositivos auxiliares, sinalização semafórica e sinalização de obras determinadas por Resolução do CONTRAN específica, e é composto dos seguintes Volumes:

Volume I – Sinalização Vertical de Regulamentação.

Volume II – Sinalização Vertical de Advertência.

Volume III – Sinalização Vertical de Indicação.

Volume IV – Sinalização Horizontal.

Volume V – Sinalização Semafórica.

Volume VI – Sinalização de Obras e Dispositivos Auxiliares.

O Departamento Nacional de Trânsito **- DENATRAN**, no uso de suas atribuições, definidas no Artigo n° 19, inciso XIX, do Código de Trânsito Brasileiro, de organizar, elaborar, complementar e alterar os manuais e normas de projetos de implementação da sinalização, dos dispositivos e equipamentos de trânsito aprovados pelo Conselho Nacional de Trânsito **- CONTRAN**, apresenta o **Volume V** do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, aprovado pela Resolução do CONTRAN N° XXX, de XX de XXXXXX de 20XX. Este **Volume V** refere-se à Sinalização Semafórica, tendo sido elaborado pela Câmara Temática de Engenharia de Tráfego, da Sinalização e da Via, gestão 2007/2009 e 2009/2011.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito, Realce

São apresentadas, para a sinalização semafórica, considerações gerais e critérios gerais para implantação dessa sinalização; características gerais para o controle semafórico e os elementos da programação semafórica.

A programação de sinalização semafórica isolada de tempo fixo, de sinalização semafórica isolada atuada e de sinalização semafórica em rede também é abordada.

São apresentados, ainda, os critérios para posicionamento da sinalização semafórica na via e os critérios para remoção de sinalização semafórica implantada.

Os **Apêndices 1** a **6** deste **Volume V** apresentam detalhes sobre a obtenção dos dados necessários à tomada de decisão sobre implantação ou remoção de sinalização semafórica e também à programação de sinalização semafórica isolada ou em rede.

2 . INTRODUÇÃO

A sinalização semafórica é um subsistema da sinalização viária que se compõe de indicações luminosas acionadas alternada ou intermitentemente por meio de sistema eletromecânico ou eletrônico. Tem a finalidade de transmitir diferentes mensagens aos usuários da via pública, regulamentando o direito de passagem ou advertindo sobre situações especiais nas vias.

A sinalização semafórica é classificada segundo sua função, que pode ser de:

- ✓ regulamentar o direito de passagem dos vários fluxos de veículos (motorizados e não motorizados) e/ou pedestres numa interseção ou seção de via;

- ✓ advertir condutores, de veículos motorizados ou não motorizados, e/ou pedestres sobre a existência de obstáculo ou situação perigosa na via.

O subsistema de sinalização semafórica é composto, basicamente, de um conjunto de indicações luminosas (semáforo ou grupo focal), fixado ao lado da via ou suspenso sobre ela, e dispositivo eletromecânico ou eletrônico (controlador) responsável pelo acionamento dessas indicações luminosas. Em situações específicas, tais como uso de dispositivos de detecção do tráfego, equipamentos de fiscalização não metrológicos e centrais de controle em área podem ser associados à sinalização semafórica de regulamentação.

A operação da sinalização semafórica **deve** ser contínua e criteriosamente avaliada quanto à sua real necessidade e adequação de sua programação.

2.1 Formas de controle do tráfego em interseção ou seção de via

A decisão pela adoção da sinalização semafórica no controle do tráfego **deve** ser precedida da avaliação da eficácia de outras formas de controle, tais como:

- ✓ controle a partir da obediência às normas gerais de circulação e conduta estabelecidas no Código de Trânsito Brasileiro (CTB);

- ✓ controle com o uso de sinalização vertical de regulamentação (placas R-1 ou R-2) e/ou de sinalização horizontal (faixa de travessia de pedestres tipo zebrada);

- ✓ implantação de rotatórias ou outras formas de canalização do tráfego em interseções.

Orientações específicas sobre estudo e gerenciamento de conflitos entre veículos, e entre veículos e pedestres, são apresentadas na seção 4.1 deste Manual.

2.2 Princípios da Sinalização Semafórica

Na concepção e na implantação da sinalização de trânsito **deve-se** ter como princípio básico as condições de percepção dos usuários da via, garantindo a real eficácia dos sinais.

Para isso, é preciso assegurar à sinalização semafórica os mesmos princípios da sinalização de trânsito em geral, descritos a seguir:

Legalidade	estar de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro **-** CTB e legislação complementar;
Suficiência	permitir fácil percepção do que realmente é importante, com quantidade de sinalização compatível com a necessidade;
Padronização	seguir um padrão legalmente estabelecido e atender à regra de que situações iguais **devem** ser sinalizadas segundo os mesmos critérios;
Clareza	transmitir mensagens objetivas de fácil compreensão; evitar a ocorrência de informação conflitante no direito de passagem;
Precisão e confiabilidade	ser precisa e confiável, corresponder à situação existente; ter credibilidade; atender aos requisitos técnicos mínimos de segurança viária e fluidez, alternando o direito de passagem de movimentos conflitantes;
Visibilidade e legibilidade	ser vista à distância necessária e em tempo hábil para a tomada de decisão;
Manutenção e conservação	estar permanentemente limpa, conservada e visível; sofrer as adequações necessárias, tais como reprogramação, atualização e remoção, acompanhando a dinâmica do trânsito.

3 . CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA

3.1 Definição e função

A sinalização semafórica tem por finalidade transmitir aos usuários a informação sobre o direito de passagem em interseções e/ou seções de via onde o espaço viário é disputado por dois ou mais movimentos conflitantes, ou advertir sobre a presença de situações na via que possam comprometer a segurança dos usuários.

É classificada, segundo sua função, em:

- ✓ **sinalização semafórica de regulamentação** – tem a função de efetuar o controle do trânsito numa interseção ou seção de via, através de indicações luminosas, alternando o direito de passagem dos vários fluxos de veículos e/ou pedestres;

- ✓ **sinalização semafórica de advertência** – tem a função de advertir sobre a existência de obstáculo ou situação perigosa, **devendo** o condutor reduzir a velocidade e adotar as medidas de precaução compatíveis com a segurança para seguir adiante.

3.2 Padrão de sinalização semafórica

3.2.1 Formas, cores e sinais

As diferentes combinações de forma, cor e sinal integrantes da sinalização semafórica possuem significados distintos e transmitem informações específicas ao condutor e pedestre.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são apresentadas as combinações envolvendo, respectivamente, focos de forma circular e retangular, conforme o estabelecido na Resolução Nº 160/04 do CONTRAN (Anexo II do CTB).

A utilização de focos com formas e/ou sinais diferentes dos previstos nas Tabelas 3.1 e 3.2, em caráter experimental, só será admitida mediante autorização expressa do CONTRAN. O uso de sinais não previstos, em caráter definitivo, somente poderá ocorrer após a devida regulamentação pelo CONTRAN.

O Apêndice 1 apresenta a diagramação dos pictogramas utilizados neste manual, exceto aqueles utilizados em semáforos de controle ou faixa reversível, cuja diagramação para o formato de foco quadrado ainda não consta da norma ABNT. Para a correta visualização, não deverá ser iluminada a área do foco semafórico externa ao pictograma.

As cores dos focos/pictogramas da sinalização semafórica devem seguir as especificações das Normas ABNT NBR7995 e NBR15889.

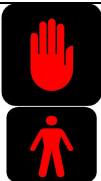
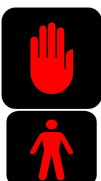
Tabela 3.1: Cores e sinais da sinalização semafórica em focos de forma circular

FORMA	COR	SINAL	SIGNIFICADO	AÇÃO DO USUÁRIO DA VIA
Circular	Vermelha		Indica a proibição do direito de passagem	Obrigatoriedade do condutor em parar o veículo
	Amarela		Indica o término do direito de passagem.	O condutor **deve** parar o veículo salvo se não for possível imobilizá-lo em condições de segurança.
	Verde		Indica a permissão do direito de passagem.	O condutor tem a permissão de iniciar ou prosseguir em marcha, podendo efetuar os movimentos de acordo com a indicação luminosa e observar as normas de circulação e conduta.
	Amarela (intermitente)		Adverte da existência de situação perigosa ou obstáculo.	O condutor **deve** reduzir a velocidade e observar as normas de circulação e conduta.
	Amarela com seta (opcional)		Indica término do direito de passagem em semáforo direcional.	O condutor **deve** parar o veículo salvo se não for possível imobilizá-lo em condições de segurança.
	Vermelha		Indica a proibição do direito de passagem de acordo com a direção e sentido da seta apresentada na indicação luminosa.	Obrigatoriedade do condutor em parar o veículo de acordo com a indicação luminosa.
	Verde		Indica a permissão do direito de passagem, de acordo com a direção e sentido da seta apresentada na indicação luminosa.	O condutor tem a permissão de iniciar ou prosseguir em marcha, podendo efetuar os movimentos de acordo com a indicação luminosa e observar as normas de circulação e conduta.
	Vermelha		Indica para o ciclista a proibição do direito de passagem.	Obrigatoriedade do ciclista em parar o veículo.
	Verde		Indica para o ciclista a permissão do direito de passagem.	O ciclista tem a permissão de iniciar ou prosseguir em marcha.

Tabela 3.2: Cores e sinais da sinalização semafórica em focos de forma quadrada

FORMA	COR	SINAL	SIGNIFICADO	AÇÃO DO USUÁRIO DA VIA
Quadrada	Vermelha		Indica para o pedestre a proibição da travessia	O pedestre **não deve** iniciar a travessia
	Vermelha (intermitente)		Indica para o pedestre o término do direito de iniciar a travessia. Sua duração **deve** permitir a conclusão das travessias iniciadas no tempo de verde.	O pedestre **não deve** iniciar a travessia. O pedestre que já iniciou a travessia no tempo de verde **deve** concluí-la, atentando para o fato de que os veículos estão prestes a receber indicação luminosa verde.
	Verde		Indica para o pedestre a permissão do direito de travessia	O pedestre tem a permissão de iniciar a travessia
	Vermelha		Indica, por meio do símbolo "X", a proibição de circular na faixa sinalizada	O condutor **não deve** circular pela faixa sinalizada
	Verde		Permite a circulação na faixa indicada pela seta	O condutor tem a permissão de circular pela faixa sinalizada

Dimensões

Os focos dos semáforos têm forma e dimensão da lente estabelecidas pela Resolução N° 160/04 do CONTRAN (Anexo II do CTB). A Tabela 3.3 apresenta a forma e dimensão dos focos com base nessa resolução.

Tabela 3.3: Formas e dimensões das lentes dos focos semafóricos

SEMÁFOROS DESTINADOS A	FORMA DO FOCO	DIMENSÃO DA LENTE (mm)
Veículos automotores	Circular	Diâmetro de 200 ou 300
Bicicletas	Circular	Diâmetro de 200 ou 300
Faixas reversíveis	Quadrada	Lado de 300 (mínimo)
Advertência	Circular	Diâmetro de 200 ou 300
Pedestres	Quadrada	Lado de 200 ou 300

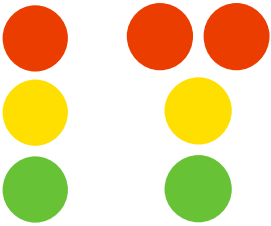
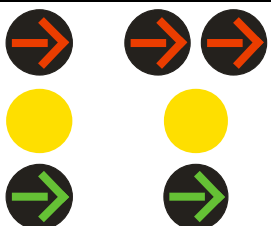
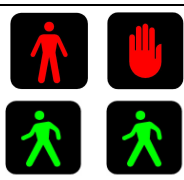
3.2.2 Tipos de semáforos

O semáforo, ou grupo focal, é o conjunto obtido pela montagem de um ou mais focos luminosos com suas faces voltadas para o sentido do movimento. Os grupos focais são empregados na sinalização semafórica de regulamentação e advertência, de acordo com a disposição apresentada na Resolução N° 160/04 do CONTRAN (Anexo II do CTB).

a) Semáforos empregados na sinalização semafórica de regulamentação

VEICULAR (EXCETO DE CICLISTA) **-** O grupo focal veicular possui três indicações luminosas: vermelha, amarela e verde, dispostas nesta ordem, de cima para baixo quando vertical, e da esquerda para a direita quando horizontal. Pode-se, também, utilizar grupo focal composto de dois focos vermelhos, um amarelo e um verde, dispostos verticalmente.

VEICULAR DIRECIONAL **-** O grupo focal veicular direcional possui três indicações luminosas: vermelha com seta, amarela com ou sem seta e verde com seta, dispostas nesta ordem, de cima para baixo quando vertical, e da esquerda para a direita quando horizontal. Pode-se, também, utilizar grupo focal composto de dois focos vermelhos com seta, um amarelo com ou sem seta e um verde com seta, dispostos verticalmente. **Deve** ser utilizado, apenas, nas aproximações em que há períodos de verde distintos para diferentes movimentos. As setas **devem** ser orientadas ou para cima, ou para a direita ou para a esquerda.

VEICULAR DIREÇÃO LIVRE – O grupo focal veicular direção livre é constituído somente pelo foco verde com seta. A seta **deve** ser orientada ou para cima, ou para a direita ou para a esquerda.

VEICULAR CONTROLE DE ACESSO ESPECÍFICO – O grupo focal “veicular controle de acesso específico” possui focos vermelho e verde, dispostos nesta ordem, de cima para baixo quando vertical, e da esquerda para a direita quando horizontal, para uso exclusivo em controles do tipo praças de pedágio e balsa.

VEICULAR CONTROLE OU FAIXA REVERSÍVEL – O grupo focal veicular controle ou faixa reversível é formado por um foco vermelho com símbolo “X” e por um foco verde com seta orientada para baixo, dispostos nesta ordem, da esquerda para a direita, na posição horizontal. No caso de semáforos de LED pode ser utilizado um foco único para mostrar as duas indicações.

PEDESTRES – Os grupos focais de pedestres são compostos por focos vermelho e verde, com os pictogramas respectivos, dispostos nesta ordem, de cima para baixo, na posição vertical.

CICLISTAS **-** Os grupos focais de ciclistas são compostos por focos vermelho, amarelo e verde, com os pictogramas respectivos, dispostos nesta ordem, de cima para baixo, na posição vertical.

Tabela 3.4: Semáforos para sinalização semafórica de regulamentação

TIPO DO SEMÁFORO	POSIÇÃO VERTICAL	POSIÇÃO HORIZONTAL
Veicular	Observação: O grupo focal pode ser configurado com vermelho 300mm e amarelo/verde 200mm	Observação: Só utilizar quando projetado sobre a via
Veicular Direcional	Observação: Opcionalmente, pode-se utilizar foco amarelo com seta.	Observações: ✓ Só utilizar quando projetado sobre a via. ✓ Opcionalmente, pode-se utilizar foco amarelo com seta.
Veicular Direção Livre		
Veicular Controle de Acesso Específico		
Veicular Controle ou Faixa Reversível	Em semáforos de LED pode ser usado foco único.	
Pedestre		

Ciclista		

b) Semáforos empregados na sinalização semafórica de advertência

Os grupos focais utilizados na sinalização semafórica de advertência **devem** ser formados por um ou dois focos amarelos em funcionamento intermitente. O foco **deve** piscar de um em um segundo (frequência de 1Hz) e na proporção aceso/apagado na faixa de 30 a 50% (lâmpada acesa).

A disposição dos focos na formação dos semáforos veiculares de advertência duplos poderá ser vertical ou horizontal (ver Tabela 3.5). No caso da utilização de dois focos em funcionamento intermitente, eles **devem** piscar alternadamente.

Em situações especiais definidas na seção 4.3 deste Manual, o semáforo de regulamentação pode ser utilizado para efeito de sinalização semafórica de advertência. Para tanto, os focos verde e vermelho são apagados e o foco amarelo opera de forma intermitente em todas as aproximações. Nessa situação os focos de pedestres também **devem** ser apagados.

Tabela 3.5: Semáforos para sinalização semafórica de advertência com dois focos

TIPO DO SEMÁFORO	POSIÇÃO VERTICAL	POSIÇÃO HORIZONTAL
Veicular		

3.2.3 Sequência de acionamento das indicações luminosas

As sequências de acionamento das indicações luminosas dos semáforos de regulamentação **devem** ser:

SEMÁFORO VEICULAR e VEICULAR DIRECIONAL:

Verde, amarelo, vermelho, retornando ao verde;

SEMÁFORO DE PEDESTRES:

Verde, vermelho intermitente, vermelho, retornando ao verde.

3.3 Relacionamento com outras sinalizações

A sinalização semafórica **deve** vir acompanhada por **Linha de Retenção (**LRE), conforme especificado no Volume IV do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (Sinalização Horizontal), em todas as aproximações da interseção ou da faixa de pedestres implantada em segmento viário localizado em meio de quadra.

Quando necessário, em função das condições de visibilidade do semáforo, **deve** ser utilizada a placa A-14 **- Semáforo à frente**, conforme especificado no Volume II do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (Sinalização Vertical de Advertência).

Quando a sinalização semafórica incluir grupos focais específicos para pedestres, **deve** vir acompanhada de **Faixas de Travessia de Pedestres** (FTP)**,** conforme especificado no Volume IV do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (Sinalização Horizontal).

Em via interceptada por ciclovia ou ciclofaixa, onde estão implantados semáforos para ciclistas, **deve** ser implantada **Marcação de Cruzamento Rodocicloviário (**MCC)**,** conforme especificado no Volume IV do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (Sinalização Horizontal).

3.4 Aspectos legais

As mensagens da sinalização semafórica de regulamentação são imperativas e seu desrespeito constitui infração, conforme Capítulo XV do CTB.

3.5 Componentes da sinalização semafórica

Os principais componentes da sinalização semafórica são descritos a seguir.

3.5.1 Semáforo (também denominado grupo focal)

Elemento que fornece informações aos condutores de veículos e aos pedestres através de indicações luminosas. É constituído por um conjunto de focos dispostos conforme apresentado nas Tabelas 3.4 e 3.5. Os principais elementos constituintes dos focos semafóricos são mostrados na Figura 3.1.

a) Foco semafórico

Unidade que fornece indicação luminosa, formada pelos seguintes elementos: conjunto óptico, máscara, pestana ou cobre-foco e caixa porta-foco.

CONJUNTO ÓPTICO **-** É formado pela lente, fonte de luz e, quando necessário, refletor.

- ✓ LENTE **-** É o elemento colocado em frente à fonte de luz para proteger os elementos internos do foco contra impactos, sujeira e intempéries e, quando necessário,

homogeneizar a distribuição da luz e dirigir o feixe luminoso aos respectivos usuários. Quando utilizada fonte de luz branca, a lente tem a função de definir a cor da indicação luminosa.

- ✓ FONTES DE LUZ - As fontes de luz usualmente utilizadas são:
  - \- lâmpada incandescente com filamento reforçado;
  - \- lâmpada halógena;
  - \- módulo ou lâmpada de LEDs (Diodos emissores de luz)
- ✓ REFLETOR – Elemento destinado a dirigir o fluxo luminoso da fonte de luz.

MÁSCARA - É o elemento colocado sobre a lente para proporcionar a visualização do símbolo ou pictograma (seta, silhueta boneco andando/parado, mão espalmada, bicicleta e “X”). As máscaras são opcionais quando utilizado um conjunto de LEDs, pois o símbolo ou pictograma pode ser obtido pela disposição dos LEDs no formato desejado.

PESTANA OU COBRE-FOCO - Superfície de forma semicilíndrica ou retangular, em cor preta fosca ou cinza fosca, acompanhando a cor da caixa porta-focos. **Deve** ser colocada sobre o foco, com o objetivo de reduzir a incidência da luz solar sobre a lente para melhoria da condição de contraste. A pestana também pode colaborar para reduzir a intervisibilidade de focos dirigidos a correntes de tráfego conflitantes.

CAIXA PORTA-FOCO – Elemento onde são fixados os conjuntos ópticos, na cor preta fosca ou cinza fosca.

(a) Foco com LED (b) Foco com lâmpada incandescente

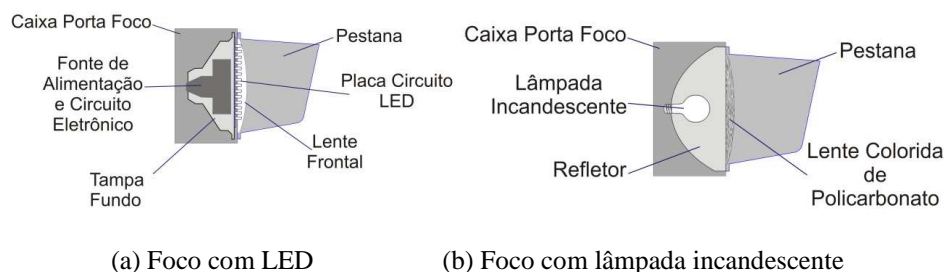



Figura 3.1: Elementos constituintes dos focos semafóricos

b) Anteparo

Anteparo é um painel que emoldura o grupo focal com o objetivo de melhorar a visibilidade em relação à incidência solar, e/ou destacar a sinalização da paisagem urbana. Em semáforo

instalado em suporte projetado sobre a via **deve** ser utilizado anteparo. Em semáforo instalado em coluna simples o uso do anteparo é opcional. A cor do anteparo **deve** ser preta fosca. As Figuras 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, anteparos sem orla e com orla interna na cor branca ou amarela, com e sem tarja branca junto à posição do foco amarelo.

Figura 3.2: Exemplos de anteparo sem orla

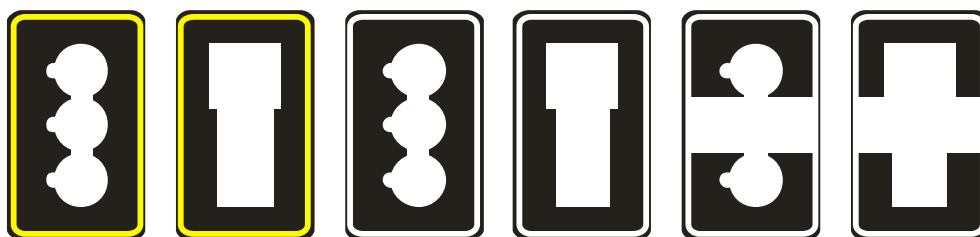



Figura 3.3: Exemplos de anteparo com orla interna

3.5.2 Elementos de sustentação

São elementos que têm a função de sustentar os semáforos, como por exemplo: colunas, braços projetados, cordoalhas e pórticos. Esses elementos **devem** ser na cor cinza ou preta fosca e suas características **não devem** comprometer a visibilidade do grupo focal.

O tipo de elemento de sustentação a ser utilizado depende da definição de alguns fatores a serem considerados na fase de projeto. Dentre esses fatores, destaca-se: necessidade de projeção sobre a via, características geométricas do local, dimensionamento da carga a ser suportada, velocidade dos ventos, condições de visibilidade, composição do tráfego e largura das vias.

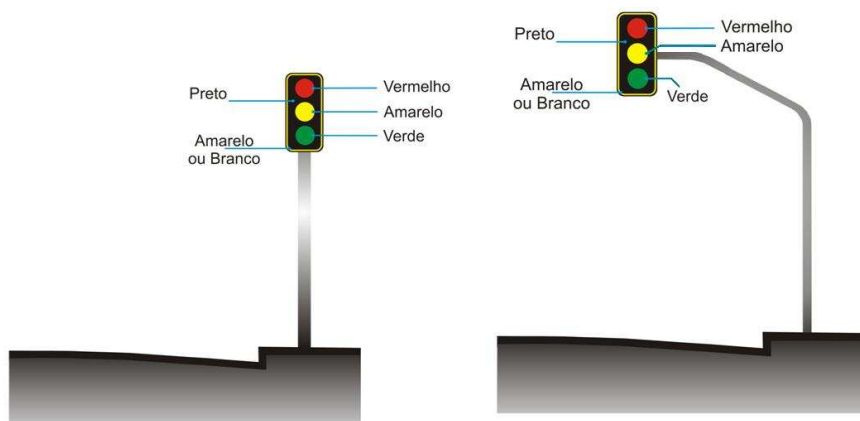
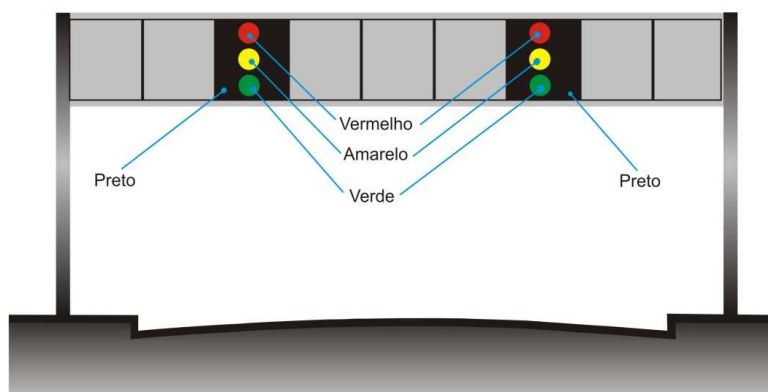
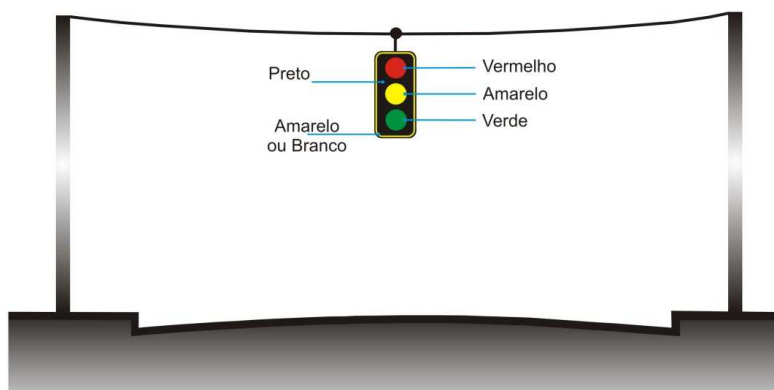
Na Figura 3.4 são apresentados desenhos ilustrativos de diferentes tipos de elementos de sustentação. A orientação quanto ao posicionamento desses elementos na via é fornecida no Capítulo 10 do presente Manual.

(a) Coluna (b) Braço projetado

(c) Pórtico

(d) Cordoalha

Figura 3.4: Elementos de sustentação

3.5.3 Controladores semafóricos

São os equipamentos programáveis que comandam as trocas das indicações luminosas dos grupos focais. Em relação à tecnologia empregada, os controladores dividem-se em eletromecânicos e eletrônicos.

CONTROLADORES ELETROMECÂNICOS – são constituídos por elementos elétricos e mecânicos. Sua programação é implementada a partir de uma combinação de recursos mecânicos. Na maioria das vezes comportam apenas uma programação semafórica e possuem recursos operacionais limitados.

CONTROLADORES ELETRÔNICOS – são constituídos por componentes elétricos e eletrônicos. Sua programação é implementada a partir de recursos computacionais do equipamento. Este tipo de tecnologia permite que os equipamentos disponham de recursos de programação que facilitam as soluções de engenharia. Diferentes tipos de controladores eletrônicos estão relacionados às diferentes estratégias de controle do tráfego, conforme apresentado no item 5.2 do presente Manual.

3.5.4 Detectores de tráfego

São dispositivos que têm a função de detectar a demanda de tráfego (veículos motorizados, não motorizados e pedestres) em determinado local.

Existem diferentes tecnologias utilizadas para este tipo de dispositivo que são escolhidas de acordo com a necessidade funcional e com as características de cada local.

3.5.4.1 Laços Detectores Indutivos

Dentre os tipos de dispositivos mais utilizados para a detecção do tráfego veicular destacam-se os laços detectores indutivos (ver Figura 3.5). Esses dispositivos são constituídos por cabos metálicos inseridos no pavimento, construídos geralmente na forma retangular, e conectados a circuitos eletrônicos dos controladores. Nesses laços circula corrente elétrica que forma um campo magnético, o qual sofre alterações quando da passagem ou presença de massa metálica, alterações estas que indicam aos controladores a passagem ou presença dos veículos.

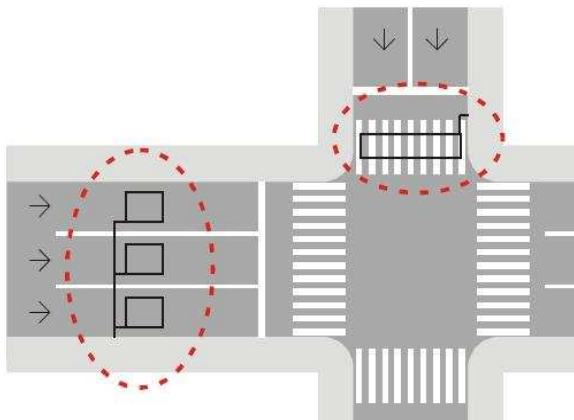



Figura 3.5: Exemplo de laços indutivos empregados para detecção veicular

3.5.4.2 Botoeiras

São dispositivos que têm a função de detectar a solicitação de pedestres em determinado local (ver Figura 3.6). A botoeira é acionada manualmente pelo pedestre para que sua presença seja detectada, de forma que o tempo de travessia associado a essa demanda seja implementado pelo controlador de tráfego. **Deve** ser utilizada sinalização educativa que indique ao pedestre a necessidade de acionar a botoeira para realizar a travessia (ver exemplos da Figura 3.7). No Apêndice 1 são apresentados os pictogramas a serem utilizados nessa sinalização).

Eventualmente a botoeira pode ser utilizada em sinalização semafórica veicular para acionar saídas de veículos de emergência.

Figura 3.6: Exemplos de botoeira

Figura 3.7: Exemplo de sinalização educativa para uso da botoeira pelo pedestre

3.5.4.3 Laços Virtuais por tratamento de imagem

O princípio de funcionamento da vídeodetecção é o de utilizar o sinal de vídeo como entrada para a unidade detectora.

A configuração do sistema de vídeodetecção consiste em sobrepor zonas de detecção em posições adequadas sobre a imagem da via visualizada no monitor de vídeo (ver Figura 3.8). À medida que os veículos percorrem a via cruzando as zonas de detecção configuradas elas são ativadas pela mudança do padrão da imagem do vídeo, resultando na detecção dos veículos.

Figura 3.8: Representação de imagem de vídeo com zonas de detecção configuradas na tela do monitor

3.5.4.4 Detectores por microondas

Os detectores que utilizam o processo de Sensor Remoto de Tráfego a Micro-ondas (**RTMS -** *Remote Traffic Microwave Sensor*) são equipamentos projetados para aplicações de tráfego que medem a distância dos objetos na trajetória de seu feixe de microondas. A capacidade de seletividade permite que o equipamento detecte veículos estacionários e móveis em diversas zonas de detecção.

Quando apontado para uma via, o feixe de microondas do equipamento projeta no pavimento uma superfície oval, cuja largura depende do modo operacional selecionado, do ângulo de montagem do sensor e da distância do sensor (ver Figura 3.9).

O equipamento tem duas configurações de montagem típicas (transversal e longitudinal) e vários modos de operação. Para aplicação em detecção na sinalização semafórica o equipamento geralmente é posicionado transversalmente à via, como ilustrado na Figura 3.10. Nesse caso, o detector está montado em suporte à margem da via com sua superfície oval apontada em ângulo reto para as faixas de rolamento. Os segmentos de seletividade correspondentes à localização das faixas de rolamento são definidos como zonas de detecção, fazendo parte do processo de configuração.

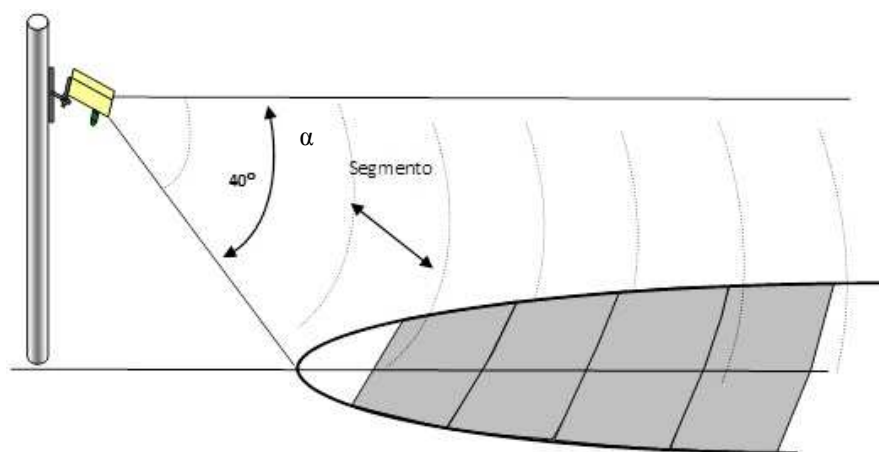



Figura 3.9: Feixe de microondas do RTMS e sua superfície oval

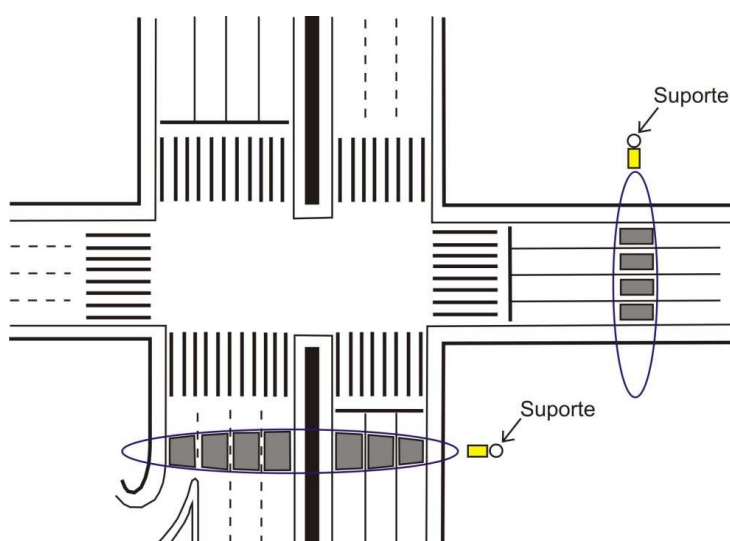



Figura 3.10: Ilustração da configuração transversal de detectores por microondas

3.5.4.5 Detecção magnética

Técnica de detecção de veículos, baseada no princípio da perturbação que os elementos metálicos provocam no campo magnético terrestre. Quando o veículo passa sobre o detector magnético sua massa metálica causa a distorção das linhas de força magnética. A Figura 3.11 ilustra a perturbação provocada no campo magnético terrestre devido à passagem de um veículo.

Normalmente, os detectores magnéticos não são capazes de reconhecer veículos parados ou em velocidades inferiores a 10 ou 15 km/h, pois necessitam que o padrão magnético se altere

significativamente ao longo do tempo para conseguir determinar a detecção. Como têm um campo de ação bastante limitado, necessitam ser posicionados diretamente sob a corrente de trânsito que se quer detectar.

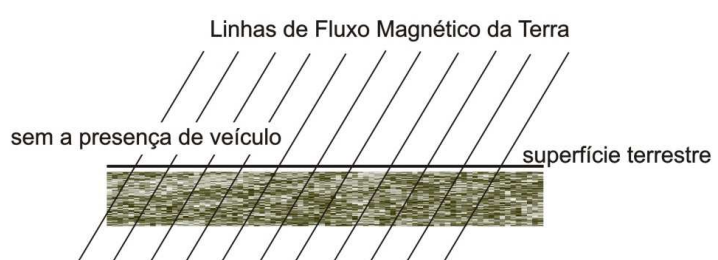
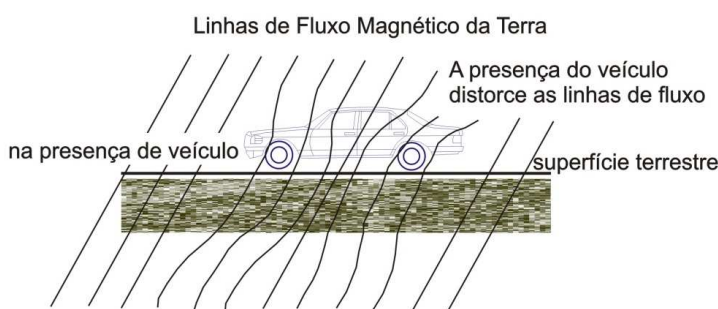
Esses detectores são fixados na superfície do pavimento, o que permite que sejam utilizados tanto em caráter permanente como temporário. Suas dimensões são usualmente da ordem de 12 cm de largura por 20 cm de comprimento e 2 cm de altura. São utilizados para controle de sinalização semafórica, contagens classificadas, detecção de presença e medição de velocidade. O uso do equipamento em aplicações temporárias é adequado devido à facilidade da sua instalação e retirada.

(a) sem a presença de veículos

(b) na presença de veículos

Figura 3.11: Ilustração da perturbação do campo magnético terrestre provocada pela passagem de um veículo (Fonte: adaptada de Traffic Detector Handbook, FHWA, 2006)

3.5.4.6 Detecção por radiação infravermelha

Técnica de detecção de veículos e pedestres fundamentada em dois tipos de captação:

a) detecção ativa: o detector envia o sinal que é refletido pelos veículos ou pedestres e captado, em seguida, pelo mesmo detector. O equipamento "ilumina" a zona de detecção na faixa infravermelha e captura as ondas refletidas pelos veículos, pelos pedestres, pela pista de rolamento ou por outros elementos próximos.

b) detecção passiva: não há emissão de energia pelo detector. O equipamento capta a radiação infravermelha gerada por outras fontes (por exemplo, raios solares), e refletida pelos veículos ou pedestres (Figura 3.12).

Esses detectores podem ser posicionados ao lado da via ou sobre a mesma. São utilizados para controle de sinalização semafórica, contagens classificadas de veículos, detecção de presença, medição de velocidade, identificação de pedestres bem como transmissão de informações aos condutores.

Figura 3.12: Emissão e reflexão de energia por veículos e superfície viária

3.5.4.7 Detecção ultrassônica

Técnica de detecção de veículos onde o detector emite energia com frequência ultrassônica que é refletida pelo veículo e captada, a seguir, por um sensor.

Os detectores ultrassônicos são posicionados sobre a pista de rolamento ou na lateral da mesma (ver Figura 3.13). Sua operação consiste em transmitir, repetidamente, pulsos de energia em direção ao pavimento e medir o tempo que cada pulso leva para retornar ao equipamento. Quando não há presença de veículos, esse tempo é função da distância entre o detector e o pavimento, portanto, fixo para cada situação. Quando ocorre uma passagem, o tempo varia em função da altura do veículo, o que possibilita, inclusive, a sua classificação.

As aplicações possíveis são: controle de sinalização semafórica, contagem classificada, detecção de presença e cálculo da taxa de ocupação. Esse sistema de detecção permite medir velocidades utilizando dois feixes próximos, formando um pequeno ângulo entre si. O intervalo entre a passagem pelos dois feixes permite calcular, com bastante precisão, a velocidade do veículo.

É possível realizar a medição da velocidade utilizando o princípio do Efeito Doppler, onde é medida a defasagem entre a onda emitida e a onda refletida. Nesse caso, um único feixe é

suficiente. Entretanto, os detectores baseados no Efeito Doppler têm o inconveniente de serem muito imprecisos na mensuração de velocidades baixas, chegando a ser totalmente insensíveis a veículos parados.

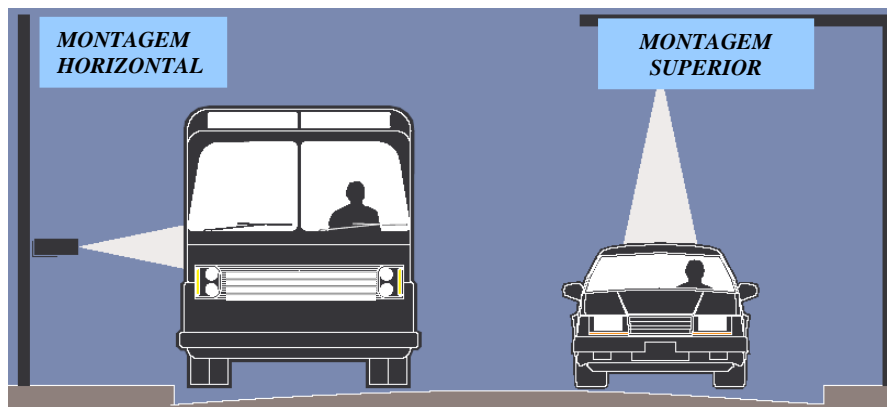



Figura 3.13: Formas de posicionamento dos detectores ultrassônicos

4. CRITÉRIOS GERAIS PARA IMPLANTAÇÃO DA SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA

Este capítulo aborda um dos principais aspectos da sinalização semafórica, que é a decisão relativa à utilização ou não dessa sinalização em locais onde o conflito dos diferentes usuários da via requer a adoção de medidas de controle. A partir dos conceitos relacionados aos movimentos numa interseção, o capítulo apresenta os critérios para a implantação da sinalização semafórica de regulamentação e para seu uso como sinalização semafórica de advertência. Aborda, também, a operação de sinalização semafórica em tempo parcial.

4.1 Estudo dos movimentos numa interseção

Para efeito do presente Manual, as vias que se interceptam em uma interseção são classificadas em principais e secundárias. Denomina-se via principal aquela que tem maior volume de tráfego em relação àquelas que a interceptam. As demais vias são denominadas secundárias.

4.1.1 Definições

O termo **movimento,** numa interseção ou trecho viário localizado em meio de quadra, é usado para identificar o fluxo de veículos que têm a mesma origem e mesmo destino, e/ou o fluxo de pedestres que se deslocam na mesma direção, mas não necessariamente no mesmo sentido. Graficamente, o movimento é representado por traço e seta, onde o traço indica a direção e a seta indica o sentido.

A Figura 4.1 ilustra a interseção de duas vias de mão única com movimentos veiculares (MV) e de pedestres (MP). Os movimentos MV1 e MV2 possuem mesma origem, porém destinos diferentes. O mesmo ocorre com os movimentos MV3 e MV4.

Os movimentos MP1 e MP2 compõem-se, cada um deles, de dois fluxos de mesma direção e sentidos opostos. Na Tabela 4.1 estão indicados os movimentos veiculares que interferem em cada um dos movimentos de pedestres considerados.

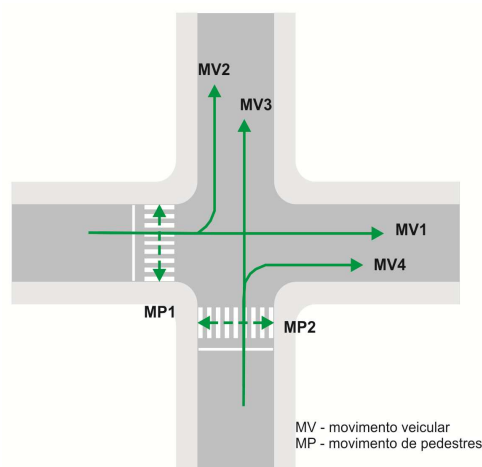



Figura 4.1: Representação de movimentos em uma interseção de duas vias de mão única

Tabela 4.1: Movimentos veiculares que interferem com os movimentos de pedestres

MOVIMENTOS	MV1	MV2	MV3	MV4
MP1	x	x		
MP2			x	x

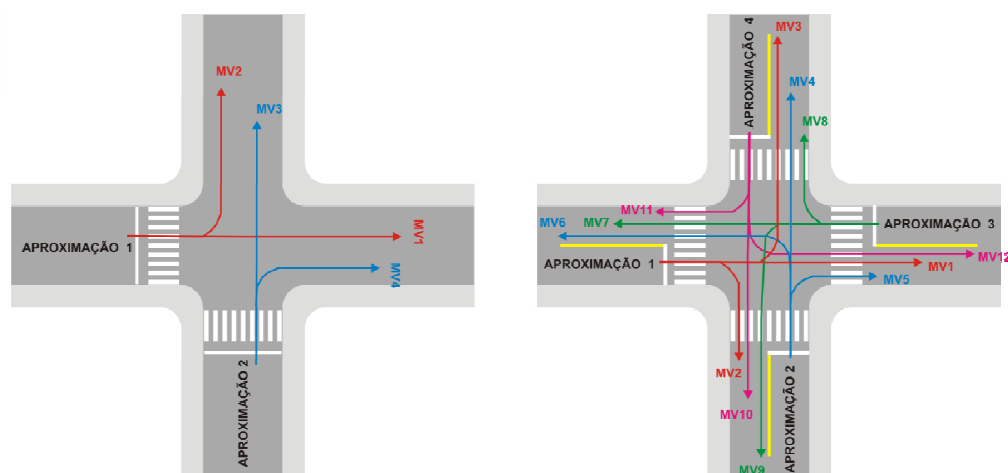
Os trechos de via por onde os veículos chegam à interseção são denominados **aproximações** da interseção. A Figura 4.2 ilustra as aproximações numa interseção de duas vias de mão única e numa interseção de duas vias de mão dupla. A área da interseção, onde os movimentos veiculares oriundos das diferentes aproximações podem interferir entre si, é denominada **área de conflito**.

(a) Interseção de vias de mão única (b) Interseção de vias de mão dupla

Figura 4.2: Representação das aproximações de interseções

Os movimentos em uma interseção, quanto à interação de suas trajetórias, podem ser classificados como:

a) **convergentes:** são movimentos que têm origem em diferentes aproximações e possuem mesmo destino (Figura 4.3);

b) **divergentes:** são movimentos que têm origem na mesma aproximação e possuem destinos diferentes (Figura 4.4);

c) **interceptantes:** são movimentos que têm origem em aproximações diferentes e que se cruzam em algum ponto da área de conflito (Figura 4.5);

d) **não-interceptantes:** são aqueles cujas trajetórias não se encontram em nenhum ponto da área de conflito (Figura 4.6).

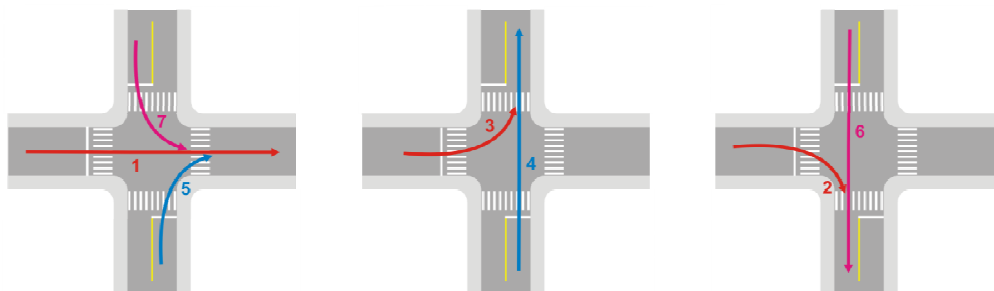



Figura 4.3: Movimentos convergentes

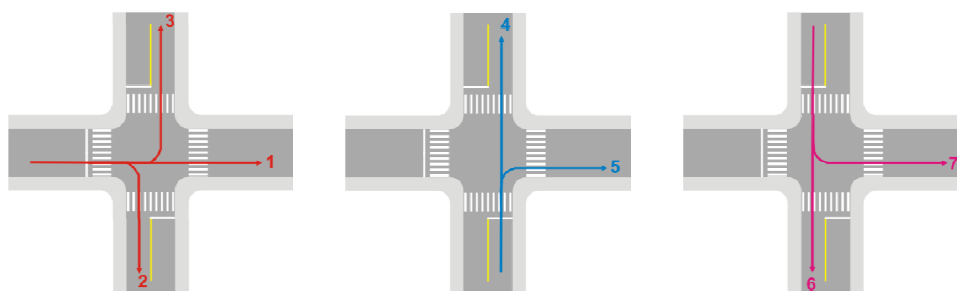



Figura 4.4: Movimentos divergentes

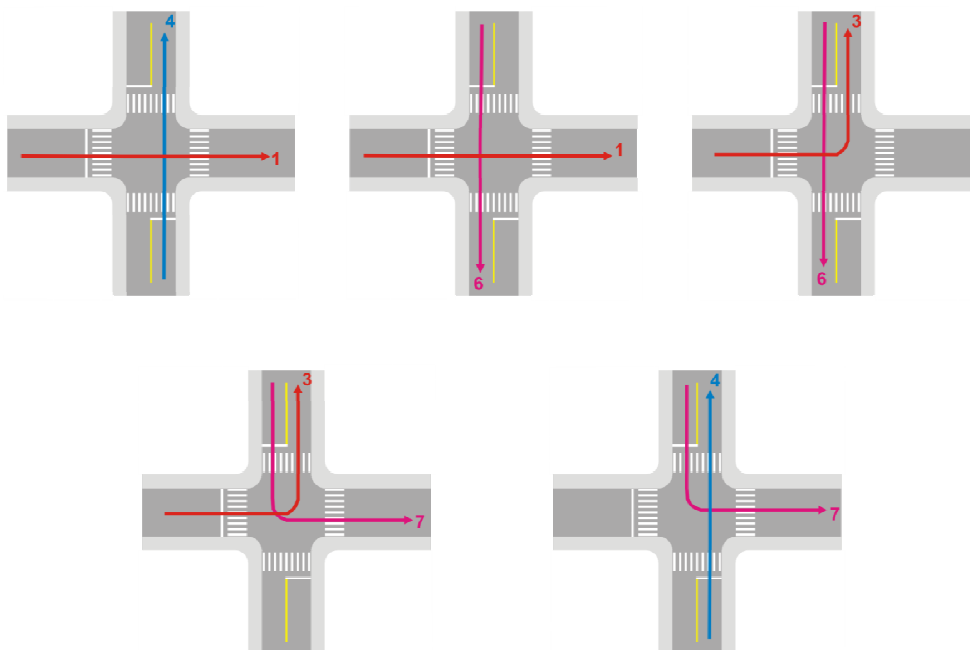



Figura 4.5: Movimentos interceptantes

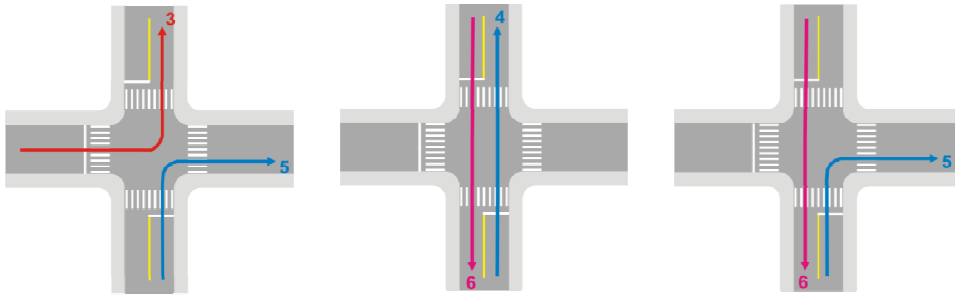
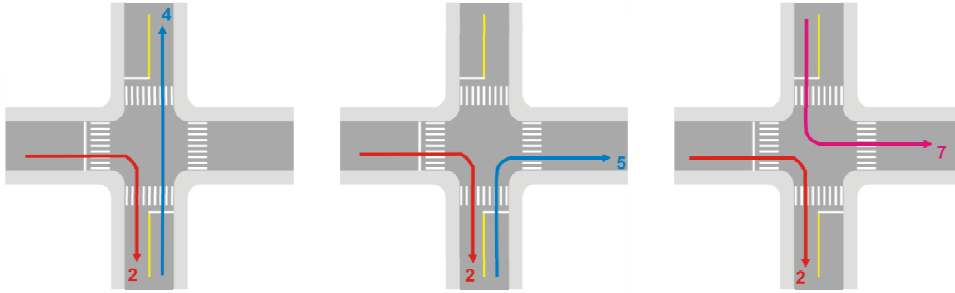



Figura 4.6: Movimentos não-interceptantes

Os movimentos, quanto à interação das suas trajetórias para efeito do controle semafórico, podem ser classificados como:

a) conflitantes: movimentos com origens diferentes cujas trajetórias se interceptam ou convergem em algum ponto da área de conflito.

b) não-conflitantes: movimentos cujas trajetórias não se interceptam nem convergem em nenhum ponto da área de conflito.

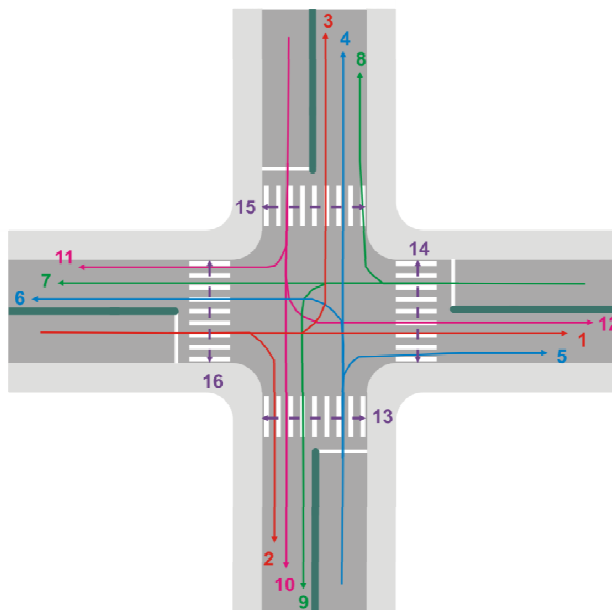
A análise dos conflitos presentes em uma dada interseção **deve** ser realizada com base na elaboração de um **diagrama de conflitos**. Esse diagrama consiste na representação esquemática da geometria da interseção, com a indicação de suas aproximações, sobre a qual são registrados todos os movimentos veiculares que ocorrem na área da interseção. Nesse diagrama também **devem** ser representados os movimentos de travessia de pedestres nas aproximações, mostrando seus conflitos com os movimentos veiculares. Um exemplo desse tipo de diagrama é mostrado na Figura 4.7, com a indicação dos movimentos veiculares conflitantes mostrada na Tabela 4.2. A Tabela 4.3 mostra a classificação dos movimentos da Figura 4.7 com relação à trajetória.

1, 2, 3.....16 são movimentos de tráfego

Figura 4.7: Exemplo de um diagrama de conflitos

Tabela 4.2: Movimentos conflitantes apresentados na Figura 4.7

MOV.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1				x	x	x			x	x		x		x		x
2									x	x			x			x
3				x		x	x	x	x	x		x			x	x
4	x		x				x	x	x			x	x		x	
5	x											x	x	x		
6	x		x				x		x	x	x	x	x			x
7			x	x		x				x	x	x		x		x
8			x	x										x	x	
9	x	x	x	x		x				x		x	x	x		
10	x	x	x			x	x		x				x		x	
11						x	x								x	x
12	x		x	x	x	x	x		x					x	x	
13		x		x	x	x			x	x						
14	x				x		x	x	x			x				
15			x	x				x		x	x	x				
16	x	x	x			x	x				x					

Tabela 4.3: Classificação dos movimentos segundo a trajetória

MOV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1		DIV	DIV	INT	CON	INT	NI	NI	INT	INT	NI	CON	NI	INT	NI	INT
2	DIV		DIV	NI	NI	NI	NI	NI	CON	CON	NI	NI	INT	NI	NI	INT
3	DIV	DIV		CON	NI	INT	INT	CON	INT	INT	NI	INT	NI	NI	INT	INT
4	INT	NI	CON		DIV	DIV	INT	CON	INT	NI	NI	INT	INT	NI	INT	NI
5	CON	NI	NI	DIV		DIV	NI	NI	NI	NI	NI	CON	INT	INT	NI	NI
6	INT	NI	INT	DIV	DIV		CON	NI	INT	INT	CON	INT	INT	NI	NI	INT
7	NI	NI	INT	INT	NI	CON		DIV	DIV	INT	CON	INT	NI	INT	NI	INT
8	NI	NI	CON	CON	NI	NI	DIV		DIV	NI	NI	NI	NI	INT	INT	NI
9	INT	CON	INT	INT	NI	INT	DIV	DIV		CON	NI	INT	INT	INT	NI	NI
10	INT	CON	INT	NI	NI	INT	INT	NI	CON		DIV	DIV	INT	NI	INT	NI
11	NI	NI	NI	NI	NI	CON	CON	NI	NI	DIV		DIV	NI	NI	INT	INT
12	CON	NI	INT	INT	CON	INT	INT	NI	INT	DIV	DIV		NI	INT	INT	NI
13	NI	INT	NI	INT	INT	INT	NI	NI	INT	INT	NI	NI		NI	NI	NI
14	INT	NI	NI	NI	INT	NI	INT	INT	INT	NI	NI	INT	NI		NI	NI
15	NI	NI	INT	INT	NI	NI	NI	INT	NI	INT	INT	INT	NI	NI		NI
16	INT	INT	INT	NI	NI	INT	INT	NI	NI	NI	INT	NI	NI	NI	NI	

Legenda: CON: convergentes; **DIV**: divergentes; **INT**: interceptantes; **NI**: não-interceptantes

4.1.2 Gerenciamento de conflitos

O gerenciamento de conflitos **deve** ser baseado em uma rotina de análise, que abrange: identificação do problema, determinação das causas prováveis e proposta de soluções. A Tabela 4.4 apresenta alguns exemplos da aplicação dessa rotina.

Tabela 4.4: Exemplos de problemas em interseções e possíveis soluções

PROBLEMA	CAUSAS PROVÁVEIS	SOLUÇÕES POSSÍVEIS	EXEMPLOS DE MEDIDAS QUE PODEM SER ADOTADAS
Fila excessiva de veículos para transpor uma interseção	O condutor não enxerga as brechas no fluxo a ser transposto e não as aproveita	- melhoria das condições de visibilidade	Remoção de interferências visuais;
			Adequação de geometria para melhor posicionamento dos veículos
	Não há brechas suficientes para a transposição pela quantidade de veículos que desejam fazê-lo	- melhor aproveitamento das brechas existentes	Aumento da capacidade da aproximação, através de proibição de estacionamento ou alargamento de pista;
			Alteração de geometria
			Implantação de sinalização semafórica
		- alternância do direito de passagem	Implantação de minirrotatórias
			Implantação de sinalização semafórica
	Muitos movimentos conflitantes	- redução do conflito	Proibição de movimentos
			Implantação de rotatória ou minirrotatória
			Alteração de circulação
			Implantação de sinalização semafórica
Ocorrência de acidentes ou risco potencial de acidentes	O condutor não enxerga as brechas e transpõe a intersecção em condições impróprias	- melhoria das condições de visibilidade	Remoção de interferências visuais
			Avanço do alinhamento da via perpendicular por meio de construção de avanço de calçada e implantação de linha de retenção ou de continuidade do alinhamento
	Não há brechas para transposição	- alternância do direito de passagem	Implantação de rotatória ou minirrotatória
			Implantação de sinalização semafórica
	As velocidades de aproximação são elevadas ou há dificuldade para avaliar a velocidade de aproximação de veículos da transversal	- redução da velocidade de aproximação	Implantação de sinalização de regulamentação de velocidade
			Implantação de fiscalização de velocidade
			Implantação de redutores de velocidade
			Implantação de sinalização semafórica
	As normas de preferência de passagem não são respeitadas	- definição das regras por meio de sinalização	Definição da preferencial por meio de sinal R-1 – Parada Obrigatória ou R-2 – Dê a Preferência
			Redefinição da via preferencial – inversão da sinalização de preferência de passagem
			Implantação de sinalização semafórica de advertência
			Implantação de rotatória ou minirrotatória
			Implantação de sinalização semafórica de regulamentação
	Muitos movimentos conflitantes	- redução dos conflitos	Proibição de movimentos por meio de sinalização
			Implantação de rotatória ou minirrotatória
			Alteração de circulação
			Implantação de sinalização semafórica (pares de vias com mão única de circulação, em sentidos opostos)

4.2 Critérios para implantação da sinalização semafórica

A sinalização semafórica é uma das alternativas para o gerenciamento de conflitos em interseções ou em meio de quadra. Antes de decidir pela implantação de sinalização semafórica, **deve** ser avaliada sua efetiva necessidade, considerando a viabilidade da adoção de outras medidas alternativas, tais como as relacionadas a seguir:

a) definição da preferência de passagem;

b) remoção de interferências que prejudiquem a visibilidade;

c) melhoria na iluminação;

d) adequação das sinalizações horizontal e vertical;

e) redução das velocidades nas aproximações;

f) adequação na geometria;

g) proibição de estacionamento;

h) implantação de refúgios para pedestres;

i) alteração de circulação;

j) inversão da preferência de passagem;

k) implantação de minirrotatórias;

l) direcionamento dos pedestres para locais de travessia seguros;

m) reforço da sinalização de advertência.

O uso apropriado da sinalização semafórica produz impactos positivos no controle de trânsito, apresentando muitas vantagens. Entretanto, quando utilizada de forma inadequada, contrariando os Princípios da Sinalização de Trânsito, apresenta consequências que causam prejuízos ao desempenho e segurança do trânsito.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as principais consequências da implantação da sinalização semafórica, quando justificada e não justificada por critérios técnicos.

Tabela 4.5: Consequências da implantação da sinalização semafórica

IMPLANTAÇÃO JUSTIFICADA	IMPLANTAÇÃO NÃO JUSTIFICADA
✓ Aumento da segurança viária ✓ Melhoria da fluidez do trânsito, na medida em que promove distribuição adequada dos tempos destinados a cada movimento ✓ Controle do direito de passagem dos movimentos de veículos e pedestres com a consequente redução de conflitos ✓ Redução de atrasos ✓ Credibilidade por parte dos usuários em relação à sinalização	✓ Aumento de ocorrência de acidentes de trânsito ✓ Imposição de atrasos excessivos ✓ Indução ao desrespeito à sinalização devido à ociosidade na operação ✓ Descrédito em relação à sinalização ✓ Gastos desnecessários de recursos públicos

O estudo para definir a necessidade da implantação da sinalização semafórica e, posteriormente, avaliar a sua eficácia, **deve** ser realizado de acordo com os procedimentos indicados na Figura 4.8.

Todos os documentos referentes à realização desse estudo **devem** ser reunidos e organizados em um relatório técnico, a fim de subsidiar o gestor de trânsito em sua decisão de implantar a sinalização semafórica e servir como histórico para consultas futuras.

No caso do estudo da implantação de sinalizações semafóricas em locais em fase de projeto, dentre os quais locais que poderão sofrer alterações de geometria e/ou sinalização, as duas etapas iniciais do procedimento **devem** ser substituídas por avaliações baseadas em estudos de previsão de demanda e em prognósticos sobre as características da operação do tráfego.

Vistorias no local em diferentes horários e dias da semana

↓

Coleta de dados relativos à segurança e fluidez

↓

AVALIAÇÃO DA EFETIVA NECESSIDADE DE IMPLANTAÇÃO DA SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA

↓

Escolha da sinalização complementar a ser utilizada

↓

Elaboração do projeto

↓

Divulgação da implantação

↓

Implantação da sinalização semafórica e da sinalização complementar

↓

Acompanhamento da operação inicial da sinalização semafórica

↓

Coleta rotineira de dados relativos à segurança e fluidez

↓

Avaliação rotineira da programação semafórica

Figura 4.8: Procedimentos para a implantação e avaliação da sinalização semafórica

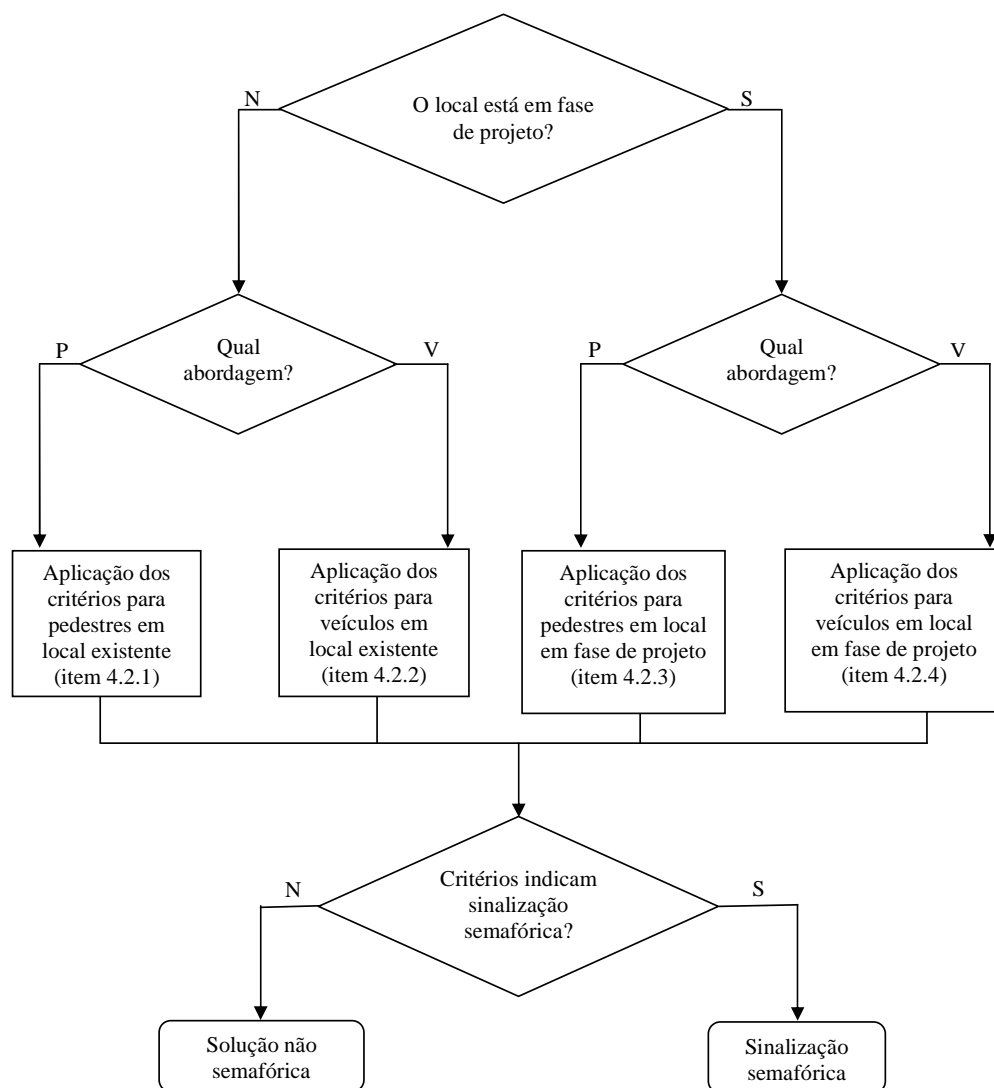
Os critérios estabelecidos para a implantação da sinalização semafórica levam em conta, inicialmente, se o local em estudo está em fase de projeto. A partir dessa condição **deve** ser definida a abordagem principal do estudo, em termos do tipo de usuário que será prioritariamente considerado: veículo ou pedestre. A abordagem referente ao usuário ciclista será tratada em manual específico. No fluxograma da Figura 4.9 é apresentada a estrutura geral para a realização do estudo para implantação de sinalização semafórica.

Legenda: S=Sim; N=Não; V= Veículo; P= Pedestre

Figura 4.9: Estrutura geral do estudo

O estudo para a implantação de sinalização semafórica, baseado nos critérios apresentados a seguir, **deve** levar em conta também o julgamento do especialista em trânsito, sobretudo em situações mais complexas. Nesses casos, técnicas mais elaboradas para a análise do impacto da sinalização semafórica sobre o desempenho do tráfego na interseção podem ser empregadas. Dentre essas técnicas, o uso de simuladores de tráfego se destaca como uma das mais eficazes e comumente adotadas no meio técnico, especialmente na análise da operação do tráfego em redes viárias.

O atendimento da entrada/saída de veículos de emergência e/ou de outras demandas prioritárias **deverá** ser objeto de avaliações operacionais e de segurança específicas. Nesses casos os critérios a seguir apresentados podem ou não ser considerados.

4.2.1 Critérios para estudos em locais existentes: abordagem pedestres

As características da via e do tráfego no local **devem** ser analisadas de modo a identificar se as mesmas impõem restrições de segurança à instalação de sinalização semafórica. Em segmentos viários com velocidades regulamentadas superiores a 70 km/h a interrupção do tráfego por meio de sinalização semafórica compromete a segurança dos veículos e dos próprios pedestres. Nesses casos, se o volume de travessias assim o justificar, **devem** ser adotadas soluções de travessia em desnível. Também em locais nas imediações de curvas horizontais ou verticais, onde exista restrição à visibilidade do condutor ao longo da distância de frenagem, a utilização da sinalização semafórica **deve** ser evitada.

Nas situações anteriormente referidas, caso não seja possível a implantação de travessia em desnível, a velocidade regulamentada **deve** ser reduzida na aproximação das faixas de pedestres, mesmo quando estas se localizam em interseções viárias. Recursos de sinalização horizontal e vertical **devem** ser empregados para garantir que o condutor consiga parar seu veículo em segurança.

O fluxograma da Figura 4.10 apresenta os critérios a serem considerados para verificação da necessidade da implantação de sinalização semafórica sob a ótica dos pedestres, em local onde não estão previstas mudanças nas características atuais de geometria e das áreas adjacentes.

Identificar a(s) travessia(s) crítica(s) [a]

Número de atropelamentos evitáveis por sinalização semafórica> $N_{L\ AT}$? [b]

S

N

Há travessias alternativas? [c]

S

N

Efetuar pesquisas [d]

Produto pedestres x espera justifica a implantação ? [e]

S

N

Sinalização semafórica [g]

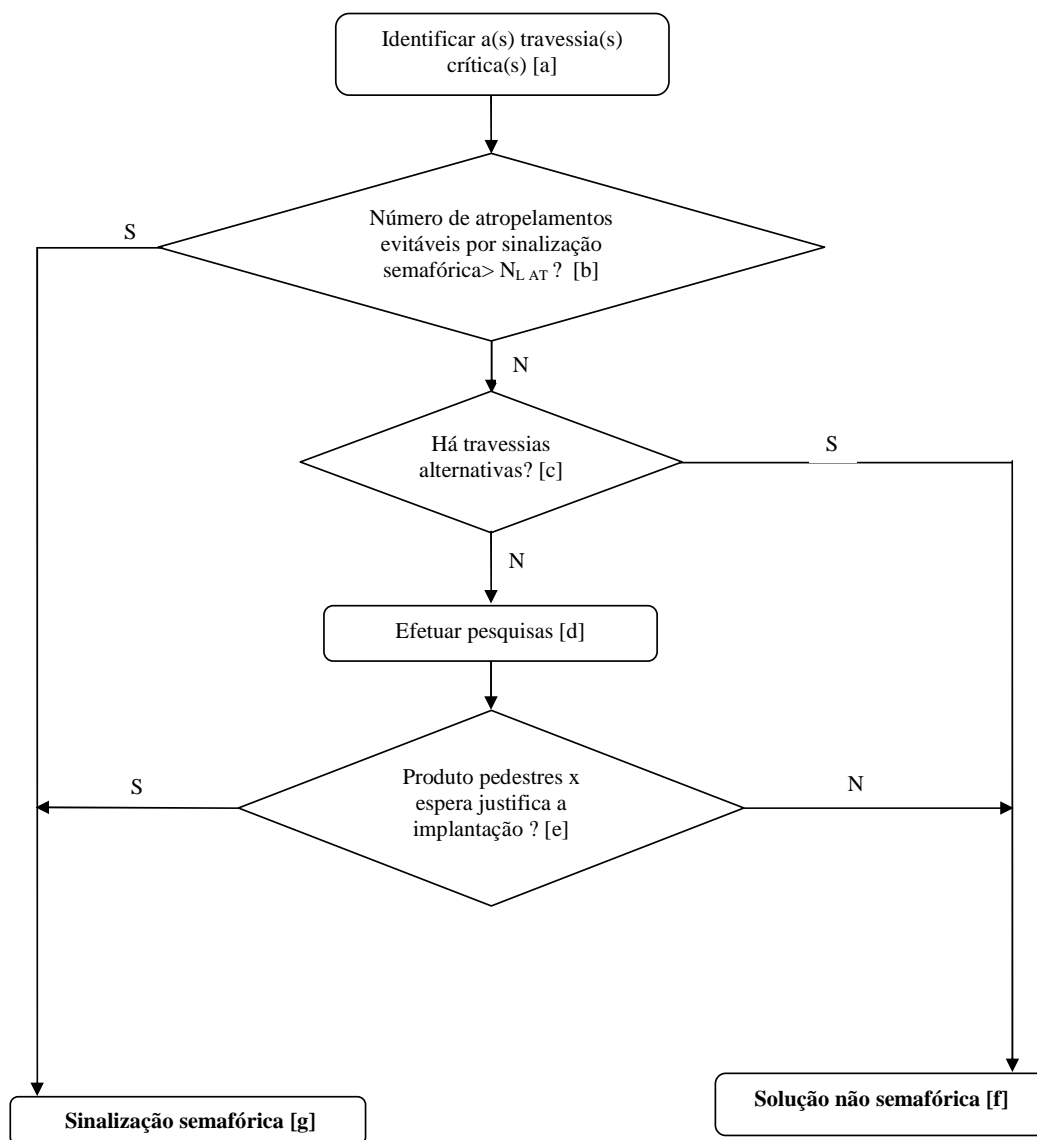
Solução não semafórica [f]

Legenda: S=Sim; N=Não

Figura 4.10: Estudos em locais existentes: abordagem pedestres

Descrição dos blocos do fluxograma:

[a] – Identificar as travessias críticas

No estudo de travessias de pedestres em meio da quadra, **deve-se** considerar que a travessia crítica ocorre na seção onde os pedestres têm mais dificuldade para atravessar ou o número de pedestres cruzando a via é maior. O estudo, quando em intersecção, **deve** considerar esses mesmos aspectos, separadamente, para cada uma das travessias existentes. Essa análise é feita, qualitativamente, a partir de vistorias no local. Geralmente, existe uma ou duas travessias críticas por intersecção. Entretanto, independentemente da quantidade de travessias críticas identificada em uma determinada interseção, os critérios definidos serão aplicados individualmente a cada travessia e não à soma dos fluxos ou à média dos atrasos de todas elas.

A identificação de travessias críticas **deve** levar em conta, também, aspectos de segurança. As travessias em locais que ofereçam perigos adicionais aos pedestres, seja devido às condições geométricas, seja por causa da velocidade dos veículos, também são consideradas críticas. O mesmo se aplica a locais de travessia utilizados por pedestres cujo deslocamento requer proteção especial (estudantes de escolas de ensino fundamental, frequentadores de instituições de saúde, portadores de necessidades especiais, etc.).

[b] – Número de atropelamentos evitáveis por sinalização semafórica é maior do que $N_{L\ AT}$?

O número mínimo limite de atropelamentos que, por si só, justifica a implantação de sinalização semafórica, $N_{L\ AT}$, é igual a 4, observado ao longo dos últimos 3 anos, ou 2 atropelamentos nos últimos 12 meses.

[c] – Há travessias alternativas?

Deve ser verificado se nas proximidades do local em estudo (aproximadamente num raio de 50m) existe possibilidade do pedestre realizar a travessia com segurança e nível aceitável de conforto, considerando-se a rota prevista para o seu deslocamento.

A definição da existência, ou da possibilidade de implantação, de travessias alternativas depende de fatores subjetivos que **devem** ser considerados pelo projetista com base nas características gerais da circulação de pedestres na área onde se insere o local em estudo.

[d] – Efetuar pesquisas

As pesquisas a serem efetuadas nos locais de travessia compreendem: identificação do volume de pedestres por hora, nos dois sentidos, e medição do tempo médio de espera do pedestre para realizar a travessia (em segundos por pedestre). Esses elementos **devem** ser observados ao longo do período crítico para a travessia de pedestres no local, durante tempo igual ou superior a uma hora. Tempos de coleta mais extensos são preferíveis e **devem** ser definidos em função dos recursos disponíveis para a realização da pesquisa.

Os pedestres que efetuam a travessia **devem** ser contados em ambos os sentidos, no entorno de 25m da travessia crítica nos cruzamentos e de 50m da travessia crítica para o meio de quadra. Os procedimentos a serem adotados na pesquisa do tempo médio de espera e na determinação do volume de pedestres na travessia crítica são detalhados no Apêndice 2.

[e] – Produto Pedestres x Tempo Médio de Espera justifica a implantação?

Calcular o produto do volume de pedestres pelo tempo médio de espera para efetuar a travessia crítica, a partir dos resultados obtidos em ***[d]***. Considerando o erro de estimativa deste produto, obter os limites de um intervalo de valores (LI=limite inferior e LS=limite superior) para o mesmo, conforme indicado no Apêndice 2.

Esses limites **devem** ser comparados com o valor de 4.750 pedestres × segundo, por hora, que corresponde a um tempo médio de espera de 25 segundos por um volume de 190 pedestres/hora na travessia.

A verificação da necessidade da implantação da sinalização semafórica **deve** ser feita com base na comparação dos valores limites (LI e LS) com o valor crítico de 4.750 pedestres × segundo, por hora, como segue:

para ***L I*** **> 4.750pedestres × segundo, por hora**, a implantação da sinalização semafórica é justificada pelo critério;

para ***LS*** **< 4.750pedestres × segundo, por hora**, a implantação da sinalização semafórica não é justificada pelo critério;

para os casos em que ***LI*** **≤ 4.750pedestres × segundo, por hora ≤** ***LS***, a decisão para implantação da sinalização semafórica fica condicionada a análises complementares por parte do técnico encarregado do estudo.

Esse critério permite contemplar com sinalização semafórica travessias onde o volume de pedestres é reduzido (inferior a 190 pedestres/hora), mas o tempo médio de espera é elevado (superior a 25 segundos), seja devido à intensidade do volume de veículos ou às características geométricas do local, seja pela presença de pedestres com velocidade de travessia reduzida.

[f] – Solução não semafórica

Adotar solução que promova a travessia segura dos pedestres, verificando a necessidade de implantar faixas de travessia devidamente sinalizadas.

[g] – Sinalização semafórica

No caso do local estudado estar em meio de quadra, **deve** ser implantada sinalização semafórica acionada pelo pedestre (equipamento dotado de botoeira) ou de tempo fixo (no caso de presença contínua de pedestres).

No caso da travessia crítica estar localizada junto à interseção, **deve** ser feita inicialmente a verificação da possibilidade de acomodar em um mesmo estágio o volume de pedestres e o fluxo veicular. Não sendo possível, **deverá** ser estabelecido um estágio exclusivo para o atendimento dos pedestres.

O dimensionamento do plano semafórico para todas as situações **deve** ser realizado de acordo com os procedimentos apresentados nos Capítulos 7 a 9 deste Manual.

4.2.2 Critérios para estudos em locais existentes: abordagem veículos

O fluxograma da Figura 4.11 apresenta os critérios a serem considerados para verificação da necessidade da implantação de sinalização semafórica sob a ótica da necessidade dos veículos, em local onde não estão previstas mudanças nas características atuais de geometria e das áreas adjacentes. Mesmo nesse caso, as condições de segurança na circulação dos pedestres **devem** ser analisadas.

S

Número Limite de colisões com vítimas evitáveis por sinalização semafórica> N_{LAV}? [a]

N

Efetuar pesquisas iniciais [b]

N

Condição do local é segura? [c]

S

Número de ciclos vazios ≥ N_{LCV} ? [d]

S

N

Efetuar pesquisas de espera [e]

S

Na transversal, tempo total de espera indica sinalização semafórica? [f]

N

Sinalização semafórica [h]

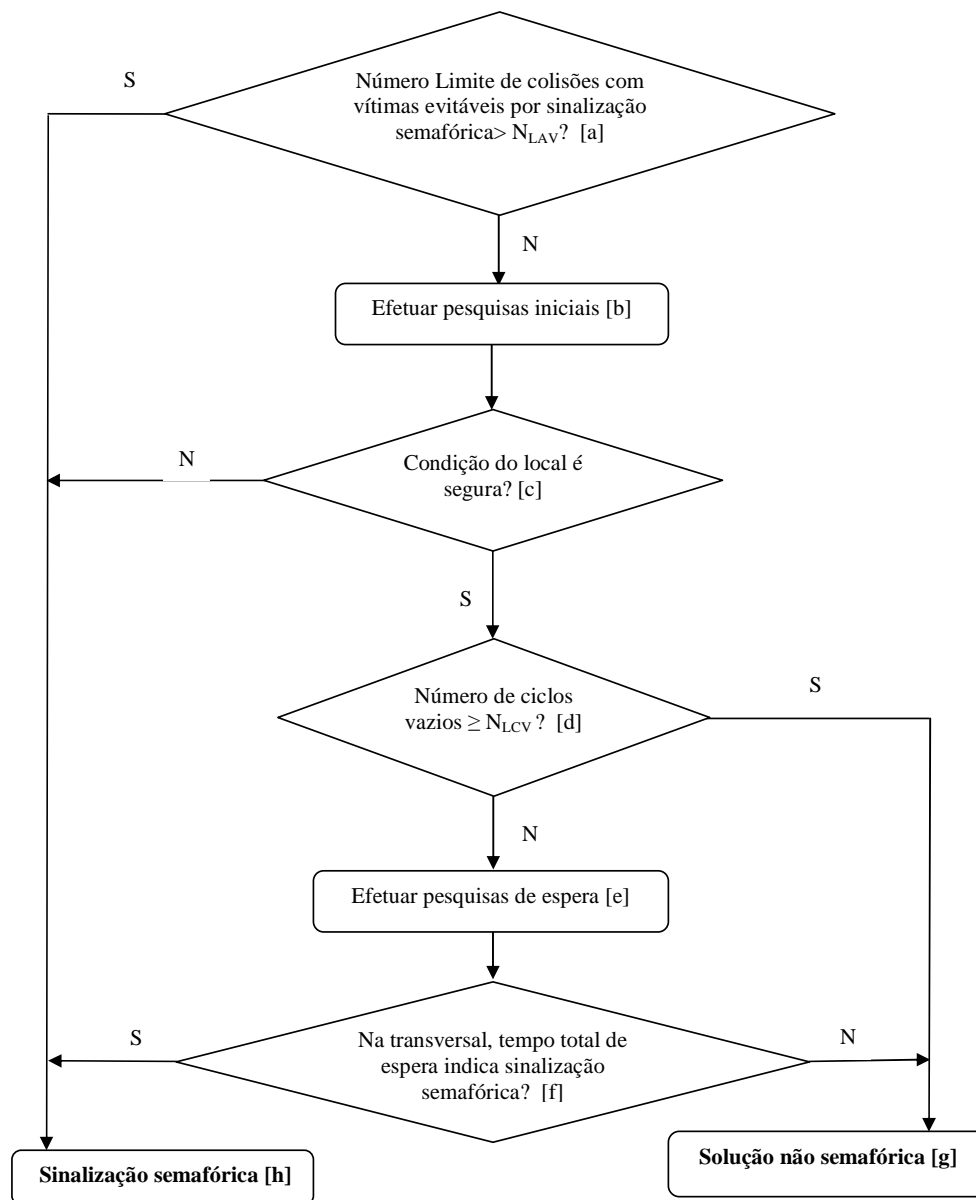
Solução não semafórica [g]

Legenda: S=Sim; N=Não

Figura 4.11: Estudos em locais existentes: abordagem veículos

Descrição dos blocos do fluxograma:

[a] – Número de colisões com vítima, evitáveis por sinalização semafórica, é maior do que $N_{L\,AV}$?

O número mínimo limite de colisões com vítimas, evitáveis por sinalização semafórica, ($N_{L\,AV}$), que justifica a implantação de sinalização semafórica é igual a 7, observado nos últimos 3 anos ou 3 nos últimos 12 meses.

Na Figura 4.12 são apresentados alguns exemplos de acidentes que podem ser evitados com a adoção da sinalização semafórica.

EXEMPLOS DE ACIDENTES EVITÁVEIS POR SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA
(considerar também outros indicadores, como os volumes veiculares das aproximações)

Figura 4.12: Exemplos de acidentes evitáveis por sinalização semafórica

[b] – Efetuar pesquisas iniciais

Fazer contagem classificada de veículos (número de veículos por tipo) em todas as aproximações da intersecção durante a sua hora-pico (ver Apêndice 3) e levantar os demais dados iniciais necessários ao estudo, tais como: número de faixas de rolamento em cada aproximação; tempo de ciclo da rede, se a interseção estiver inserida em uma via com sinalizações semafóricas operando de forma coordenada; distância da interseção estudada às interseções controladas por sinalização semafórica a montante e a jusante.

Calcular o número de veículos equivalentes, a partir da conversão de todos os tipos de veículos observados em unidades de carros de passeio (ucp), seguindo os procedimentos apresentados no Capítulo 6.

[c] – Condição do local é segura?

Verificar se o local apresenta características que comprometam a segurança dos usuários na interseção. Essas características referem-se principalmente à geometria da via nas proximidades da interseção (curvas horizontais ou verticais), à existência de edificações ou outros elementos que dificultem a intervisibilidade dos movimentos conflitantes, ou à configuração da interseção que dificulta a percepção natural de qual via é a via principal. Nesse último caso, a sinalização semafórica só se justifica após terem sido testadas sem sucesso diferentes alternativas para a solução do problema por meio da sinalização horizontal e vertical.

[d] – Número de ciclos vazios é maior ou igual a NL CV?

A implantação da sinalização semafórica na abordagem veicular visa, principalmente, propiciar segurança e fluidez ao fluxo da via secundária. Assim, para o caso da utilização de sinalização semafórica de tempo fixo, é preciso verificar se, para o tempo de ciclo que a sinalização semafórica teria caso fosse instalada, existiriam ciclos sem nenhuma demanda na via secundária, isto é, ciclos vazios. Para que a sinalização semafórica seja instalada segundo este critério, o número de ciclos vazios por hora, na hora-pico, **deve** ser inferior a um limite estabelecido pelo projetista (N_{LCV}) em função das características gerais de cada cidade. No entanto, em todas as situações, N_{LCV} **deve** ser menor ou igual a 10% do número de ciclos por hora (NC).

A estimativa do número de ciclos vazios na hora-pico (sem demanda na via secundária) é feita de acordo com os passos a seguir:

Passo 1: determinação do tempo de ciclo (C) em segundos, que a sinalização semafórica teria, se instalado, ou, no caso de interseção inserida em via com sinalização semafórica operando de modo coordenado, adoção do tempo de ciclo da rede. O tempo de ciclo da rede somente **deve** ser considerado se pelo menos uma das interseções adjacentes estiver a menos de 500m da interseção estudada.

Passo 2: determinação do número de ciclos por hora (NC)

$$NC = \frac{3600}{C}$$

Passo 3: determinação do fluxo total das aproximações da via secundária (FTS), expresso em termos de unidade de carros de passeio (ucp) por hora.

Passo 4: determinação do número médio de veículos por ciclo, em termos de ucp, nas aproximações da via secundária (m).

$$m = \frac{FTS}{NC}$$

Passo 5: determinação do número esperado de ciclos vazios nas aproximações da via secundária, ou seja, do número de ciclos em que não existem veículos na via secundária chegando à interseção (NCV).

$$NCV = e^{-m} \times NC$$

onde:

e = base dos logaritmos neperianos (igual a 2,72)

A determinação do NCV pressupõe que as chegadas às aproximações da via secundária são aleatórias, seguindo uma distribuição de Poisson.

Quando o fluxo que chega ao menos a uma das aproximações da via secundária for proveniente de uma sinalização semafórica a montante, o pressuposto de chegadas aleatórias não mais se verifica. Assim, o valor do NCV estimado pelo procedimento anteriormente descrito **deve** ser utilizado com reservas. O ideal, nesses casos, é estimar NCV por meio de recursos mais elaborados, como técnicas de simulação da operação do tráfego em rede.

[e] – Efetuar pesquisas de espera

Determinar o tempo total de espera dos veículos da via secundária. O procedimento para o levantamento desse tempo em campo é apresentado no Apêndice 4.

[f] – Na transversal, tempo total de espera indica sinalização semafórica?

Se o tempo total de espera for inferior a 6.000 ucp x segundo, por hora, que corresponde a um atraso médio de 15 segundos sofrido por um fluxo de 400 ucp/hora na via secundária (sem considerar as motos), a sinalização semafórica **não deve** ser implantada.

No caso do tempo total de espera ser superior a 14.000 ucp x segundo, por hora, que corresponde a um atraso médio de 35 segundos sofridos por um fluxo de 400 ucp/hora na via secundária (sem considerar as motos), a sinalização semafórica deve ser implantada.

Para tempo total de espera entre 6.000 e 14.000 ucp x segundo, por hora, a decisão para implantação da sinalização semafórica fica condicionada a análises complementares por parte do técnico encarregado do estudo.

[g] – Solução não semafórica

Adotar solução que promova a segurança do tráfego na interseção sem comprometer desnecessariamente a fluidez da via principal. Dentre as soluções possíveis, referidas na Tabela 4.4, destaca-se: redução das velocidades nas aproximações, adequação da geometria, implantação de minirrotatórias e mudança no sentido de circulação com eliminação do conflito.

[h] – Sinalização semafórica

Definir a estratégia e o tipo de controle a ser propiciado pela sinalização semafórica. O dimensionamento do plano semafórico para a situação definida **deve** ser realizado de acordo com os procedimentos apresentados nos Capítulos 7 a 9 deste Manual.

4.2.3 Critérios para estudos em locais em fase de projeto: abordagem pedestres

Em segmentos viários com velocidades regulamentadas superiores a 70 km/h a interrupção do tráfego por meio de sinalização semafórica compromete a segurança dos veículos e dos próprios pedestres. Nesses casos, se o volume de travessias assim o justificar, **devem** ser adotadas soluções de travessia em desnível.

Nas imediações de curvas horizontais ou verticais, onde exista restrição à visibilidade do condutor ao longo da distância de frenagem, a utilização da sinalização semafórica **deve** ser evitada.

Nas situações anteriormente referidas, caso não seja possível a implantação de travessia em desnível, a velocidade regulamentada **deve** ser reduzida na aproximação das faixas de pedestres, mesmo quando estas se localizam em interseções viárias. Recursos de sinalização horizontal e vertical **devem** ser empregados para garantir que o condutor consiga parar seu veículo com segurança.

O fluxograma da Figura 4.13 apresenta os critérios a serem considerados para verificação da necessidade da implantação de sinalização semafórica sob a ótica dos pedestres, em locais em fase de projeto.

Identificar a(s) travessia(s) crítica(s) [a]

Há travessias alternativas? [b]

S

N

Estimativa do volume de pedestres na hora pico [c]

Estimativa do tempo de travessia e da espera dos pedestres [d]

S

Produto pedestres × espera ≥ 4750? [e]

N

Sinalização semafórica [g]

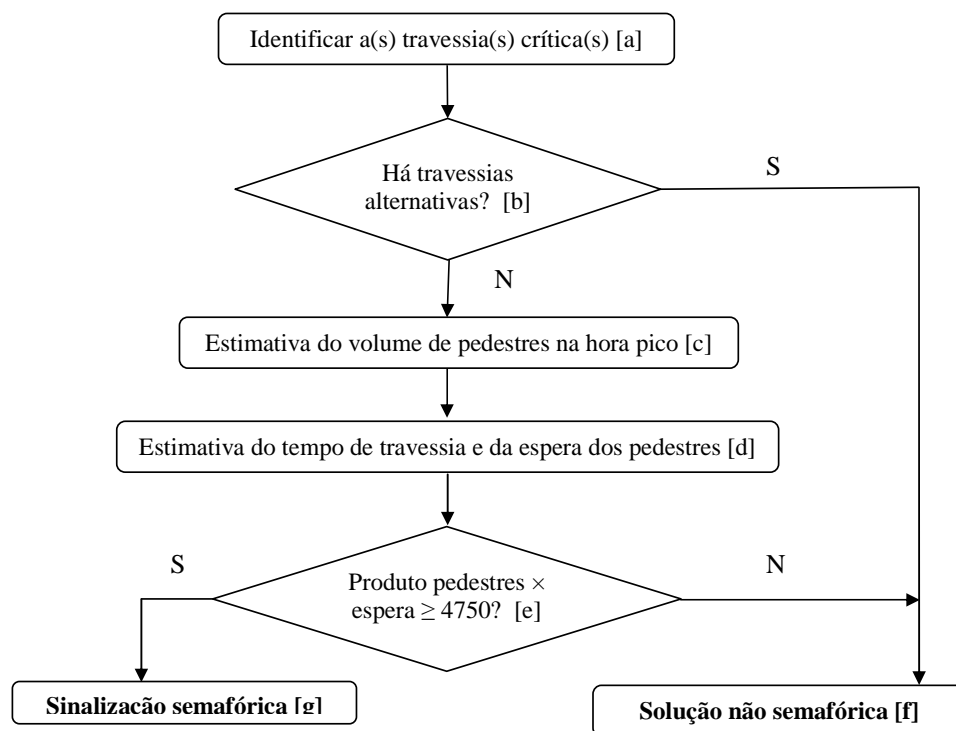
Solução não semafórica [f]

Legenda: S=Sim; N=Não

Figura 4.13: Estudos em locais em fase de projeto: abordagem pedestres

Descrição dos blocos do fluxograma:

[a] – Identificar as travessias críticas

Devem ser identificadas e analisadas as rotas esperadas de pedestres em função da presença de polos geradores de viagens a pé (pontos de ônibus, escolas, hospitais, shoppings, etc.). As análises **devem** considerar a continuidade dos itinerários e as características físicas do entorno (topografia, largura de calçadas, obstáculos, segurança pública, etc.), que afetarão diretamente a decisão do pedestre na realização da travessia. Serão consideradas críticas as travessias com potencial de concentração de diferentes rotas esperadas de pedestres.

Se o local em estudo for uma interseção, cada uma das travessias previstas **deve** ser analisada separadamente.

[b] – Há travessias alternativas?

Deve ser verificado se nas proximidades do local em estudo (aproximadamente 50m) existe possibilidade do pedestre realizar a travessia com segurança e nível aceitável de conforto, considerando-se a rota prevista para o seu deslocamento.

A definição da existência, ou da possibilidade de implantação, de travessias alternativas depende de fatores subjetivos que **devem** ser considerados pelo projetista com base nas características gerais da circulação de pedestres na área onde se insere o local de estudo.

[c] – Estimativa do volume de pedestres na hora-pico

Estimar o volume de pedestres que ocorrerá em cada travessia crítica em função de eventuais polos geradores a serem criados e do remanejamento que o novo projeto provocará na distribuição do volume atual de pedestres.

[d] - Estimativa do tempo de travessia e cálculo do tempo médio de espera dos pedestres

O tempo de travessia é estimado por meio da Equação 4.1.

$$Tt = \frac{Lp}{Vt} \qquad (4.1)$$

sendo:

Tt = tempo de travessia [s];

Vt = velocidade do pedestre na travessia [m/s];

Lp = largura da pista [m].

Considera-se a velocidade de travessia dos pedestres igual a 1,2 m/s. Dependendo das características específicas dos pedestres no local em estudo, o projetista pode ter que adotar valores inferiores.

O tempo médio de espera dos pedestres **deve** ser estimado a partir do uso do simulador TESP, disponível na página do Denatran na Internet (ver Apêndice 5).

Este é o tempo médio de espera de todos os pedestres na travessia crítica e, por isso, não cabe o cálculo de erro de estimativa como ocorre com a determinação por meio de amostra.

[e] - Produto pedestres×tempo médio de espera ≥ 4.750 pedestres × segundo, por hora?

Calcular o produto do volume de pedestres pelo tempo médio de espera, a partir dos resultados obtidos em ***[c]*** e ***[d]***.

Esse produto **deve** ser maior ou igual a 4.750 pedestres × segundo, por hora, que corresponde a um tempo médio de espera de 25 segundos para um volume de 190 pedestres/hora na travessia.

Esse valor **deve** ser usado como referência para a decisão da implantação ou não da sinalização semafórica. Ele permite contemplar com sinalização semafórica travessias onde o volume de pedestres é inferior ao valor de referência mas sofre atrasos elevados, seja devido à intensidade do volume de veículos ou às características geométricas do local, seja pela presença de pedestres com velocidade de travessia reduzida.

O simulador TESP, que estima o tempo médio de espera, também fornece o resultado da aplicação do presente critério. As principais características do simulador, bem como as instruções para sua utilização, são apresentadas no Apêndice 5.

[f] – Solução não semafórica

Adotar solução que promova a travessia segura dos pedestres, verificando a necessidade de implantar faixas de travessia devidamente sinalizadas.

[g] – Sinalização semafórica

No caso do local estudado estar em meio de quadra, **deve** ser implantada sinalização semafórica acionada pelo pedestre (equipamento dotado de botoeira).

No caso da travessia crítica estar localizada junto à interseção, **deve** ser feita inicialmente a verificação da possibilidade de acomodar em um mesmo estágio o volume de pedestres e o fluxo veicular. Não sendo possível, **deve** ser estabelecido um estágio exclusivo para o atendimento aos pedestres.

O dimensionamento do plano semafórico para todas as situações **deve** ser realizado de acordo com os procedimentos apresentados nos Capítulos 7 a 9 deste Manual.

4.2.4 Critérios para estudos em locais em fase de projeto: abordagem veículos

O fluxograma da Figura 4.14 apresenta os critérios a serem considerados para verificação da necessidade da implantação de sinalização semafórica sob a ótica dos veículos, em local que se encontra em fase de projeto.

Determinar grandezas envolvidas [a]

Calcular programação [b]

Há fatores de risco no local? [c]

S

N

Número de ciclos vazios $\geq N_{L\ CV}$? [d]

S

N

É possível estimar o atraso dos veículos na via secundária? [e]

S

N

Considerar atraso estimado [f]

Aplicar critério de fluxos mínimos [g]

Na transversal, combinação fluxo com espera indica sinalização semafórica? [i]

S

Critério justifica implantação de sinalização semafórica? [h]

N

S

N

Sinalização semafórica [j]

Solução não semafórica [k]

Legenda: S=Sim; N=Não

Figura 4.14: Estudos em locais em fase de projeto: abordagem veículos

Descrição dos blocos do fluxograma:

[a] – Determinar grandezas envolvidas

Determinar, para todas as aproximações da interseção, os dados necessários à programação da sinalização semafórica, tais como os valores de taxa de fluxo (hora pico), fluxo de saturação e tempo perdido. Os dois primeiros são os próprios valores que foram utilizados no projeto de reconfiguração/definição do local estudado.

Calcular o número de veículos equivalentes, a partir da conversão de todos os tipos de veículos observados em unidades de carros de passeio (ucp), seguindo os procedimentos apresentados no Capítulo 6.

[b] – Calcular programação

Calcular a programação semafórica do local a partir dos dados do item **[a],** seguindo os procedimentos indicados neste Manual para sinalização semafórica de tempo fixo. Esse cálculo visa permitir a análise a ser efetuada em ***[d]***.

[c] – Há fatores de risco presentes no local?

Verificar se o local apresenta características que comprometam a segurança dos usuários na interseção. Essas características referem-se principalmente à geometria da via nas proximidades da interseção (curvas horizontais ou verticais) ou à existência de edificações ou outros elementos que dificultem a intervisibilidade dos movimentos conflitantes.

[d] – Número de ciclos vazios é maior ou igual a $N_{L\,CV}$?

A implantação da sinalização semafórica na abordagem veicular visa, principalmente, propiciar segurança e fluidez ao fluxo da via secundária. Assim, para o caso da utilização de sinalização semafórica de tempo fixo, é preciso verificar se na programação calculada em **[b]** existirão ciclos sem nenhuma demanda na via secundária, isto é, ciclos vazios. O número de ciclos vazios por hora, na hora-pico, **deve** ser inferior a um limite estabelecido pelo projetista (N_{LCV}) em função das características gerais de cada cidade. No entanto, em todas as situações, N_{LCV} **deve** ser menor ou igual a 10% do número de ciclos por hora (NC).

A estimativa do número de ciclos vazios na hora-pico, sem demanda na via secundária, é feita de acordo com os passos a seguir:

Passo 1: determinação do tempo de ciclo (C) em segundos, que a sinalização semafórica teria, se instalada, ou, no caso de interseção inserida em via com sinalização semafórica operando de modo coordenado, adoção do tempo de ciclo adotado para a rede. O tempo de ciclo da rede somente **deve** ser considerado se pelo menos uma das interseções adjacentes estiver a menos de 500m da interseção estudada.

Passo 2: determinação do número de ciclos por hora (NC).

$$NC = \frac{3600}{C}$$

Passo 3: determinação da taxa de fluxo total das aproximações da via secundária (FTS), expresso em termos de unidades de carro de passeio (ucp) por hora.

Passo 4: determinação do número médio de veículos por ciclo, expresso em ucp, nas aproximações da via secundária (m).

$$m = \frac{FTS}{NC}$$

Passo 5: determinação do número esperado de ciclos vazios nas aproximações da via secundária, ou seja, do número de ciclos em que não existem veículos na via secundária chegando à interseção (NCV).

$$NCV = e^{-m} \times NC$$

onde:

e = base dos logaritmos neperianos (igual a 2,72)

A determinação do NCV considera que as chegadas nas aproximações da via secundária são aleatórias, seguindo uma distribuição de Poisson.

Quando o fluxo que chega em pelo menos uma das aproximações da via secundária for proveniente de uma sinalização semafórica a montante, o pressuposto de chegadas aleatórias não mais se verifica. Assim, o valor do NCV estimado pelo procedimento anteriormente descrito **deve** ser utilizado com reservas, somente quando não for possível estimar NCV por meio de recursos mais elaborados, como técnicas de simulação da operação do tráfego em rede.

[e] – Verificar se é possível estimar o atraso dos veículos da via secundária na situação não semaforizada

Verificar se o órgão dispõe de técnicas analíticas ou simuladores, devidamente calibrados para representar as condições de operação do tráfego local, que permitam a estimativa do atraso médio dos veículos na(s) aproximação(ões) da via secundária.

[f] – Considerar o atraso dos veículos da via secundária na situação não semaforizada

Usando a(s) técnica(s) disponível(is), estimar o atraso médio dos veículos da via secundária na situação não semaforizada.

[g] – Aplicar critério de fluxos mínimos

Considerar os valores dos fluxos estimados para a hora-pico, previstos no bloco [a], e aplicá-los aos gráficos correspondentes, mostrados nas Figuras 4.15 e 4.16, extraídas do *Manual on Uniform Traffic Control Devices* (MUTCD-2003).

O gráfico da Figura 4.15, correspondente ao Caso 1, **deve** ser utilizado quando a velocidade limite definida para a via principal é inferior a 70km/h. No caso em que essa velocidade for superior ou, ainda, quando a interseção em estudo estiver localizada em cidade com população inferior a 10.000 habitantes, **deve** ser utilizado o gráfico da Figura 4.16 (Caso 2).

No Caso 1, a implantação de sinalização semafórica só pode ser justificada quando a aproximação mais carregada da via secundária apresentar fluxo igual ou superior a 150 veículos/h, se essa aproximação tiver duas ou mais faixas de trânsito. Quando a aproximação mais carregada da via secundária tiver somente uma faixa, o valor mínimo do fluxo veicular que pode justificar a sinalização semafórica é de 100 veículos/h. No Caso 2, estes limites são, respectivamente, 100 veículos/h e 75 veículos/h.

Para efeito da utilização dos gráficos é possível a utilização do fluxo expresso em veículos equivalentes, desde que essa unidade seja adotada para as aproximações das duas vias (ver procedimento no Capítulo 6).

Identificar no gráfico correspondente ao caso considerado (Figura 4.15 ou 4.16) o ponto definido pelos fluxos estimados para a aproximação mais carregada da via secundária e para todas as aproximações da via principal.

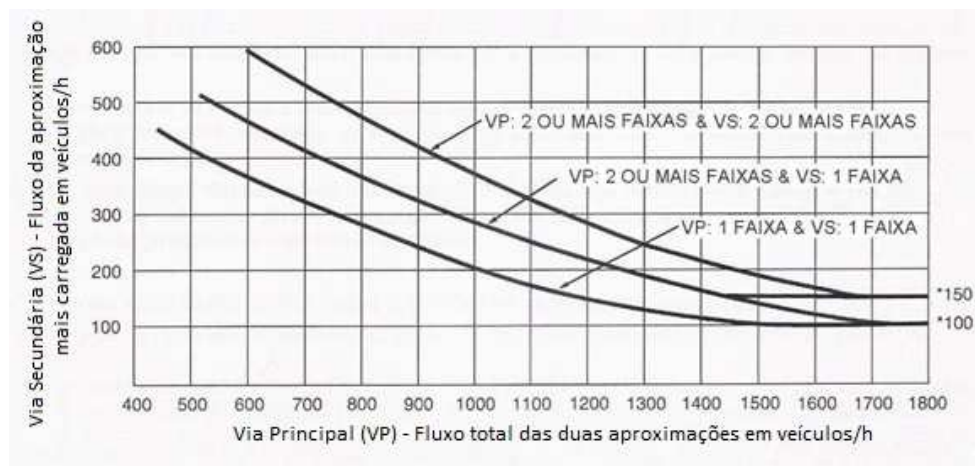



Figura 4.15: Valores de volume (fluxo) que justificam a implantação de sinalização semafórica em locais em fase de projeto: Caso 1 (Fonte: MUTCD-2003)

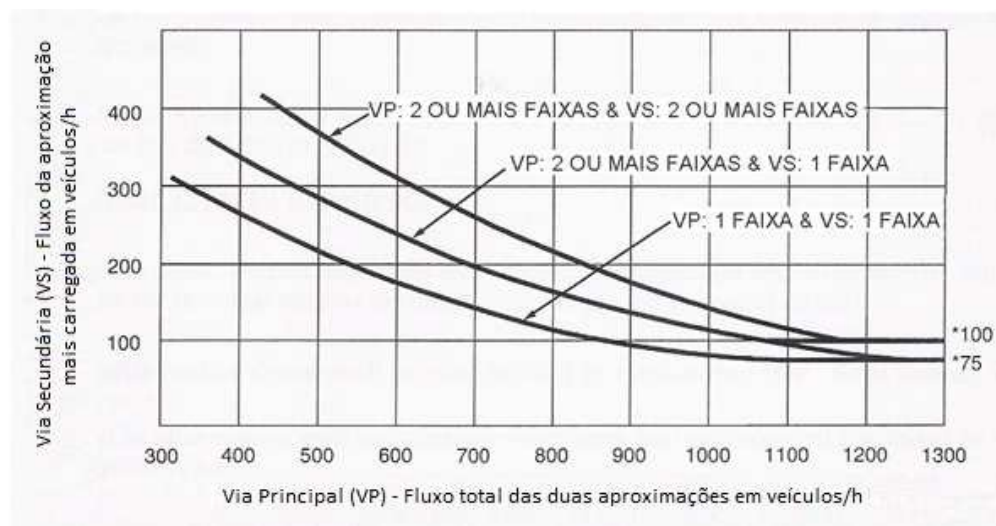



Figura 4.16: Valores de volume (fluxo) que justificam a implantação de sinalização semafórica em locais em fase de projeto: Caso 2 (Fonte: MUTCD-2003)

[h] – O Critério justifica a implantação de sinalização semafórica?

Se o ponto identificado em [g] estiver acima da linha referente ao número de faixas das vias principal e secundária, a implantação da sinalização semafórica é justificada pelo critério.

[i] – Na transversal, combinação fluxo com espera indica sinalização semafórica?

Calcular o produto do fluxo de veículos da via secundária pelo atraso médio, a partir dos resultados obtidos em ***[a]*** e ***[f]***.

Se o tempo total de espera for inferior a 6.000 ucp x segundo, por hora, que corresponde a um atraso médio de 15 segundos para um fluxo de 400 ucp/hora na via secundária (sem considerar as motos), a sinalização semafórica **não deve** ser implantada.

No caso do tempo total de espera ser superior a 14.000 ucp x segundo, por hora, que corresponde a um atraso médio de 35 segundos para um fluxo de 400 ucp/hora na via secundária (sem considerar as motos), a sinalização semafórica **deve** ser implantada.

Para tempo total de espera entre 6.000 e 14.000 ucp x segundo, por hora, a decisão para implantação da sinalização semafórica fica condicionada a análises complementares por parte do técnico encarregado do estudo.

[j] – Sinalização semafórica

Definir a estratégia e o tipo de controle a ser propiciado pela sinalização semafórica. O dimensionamento do plano semafórico para a situação definida pode ser realizado de acordo com os procedimentos apresentados nos Capítulos 7 a 9 deste Manual.

[k] – Solução não semafórica

Adotar solução que promova a segurança do tráfego na interseção sem comprometer desnecessariamente a fluidez da via principal. Dentre as soluções possíveis, referidas na Tabela 4.4, destaca-se: redução das velocidades nas aproximações, adequação da geometria e implantação de minirrotatórias.

4.3 Critérios para utilização da sinalização semafórica operando em amarelo intermitente

Os controladores semafóricos eletrônicos permitem a programação, por horário, para operação em amarelo intermitente. Nesse caso o condutor do veículo fica obrigado a reduzir a velocidade e respeitar o disposto no Art. 29, inciso III, do CTB.

4.3.1 Utilidade da operação em amarelo intermitente

Em horários em que a demanda de veículos em uma interseção semaforizada é muito baixa, a sinalização semafórica, quando programada em tempos fixos, acaba gerando paradas desnecessárias. Em geral, as situações de baixa demanda ocorrem durante a madrugada.

Sinalizações semafóricas exclusivas para travessia de pedestres em meio de quadra também podem operar em amarelo intermitente em períodos onde a demanda de pedestres é muito reduzida.

Quando utilizado corretamente, o amarelo intermitente reduz as paradas dos veículos. Entretanto, existem várias restrições ao seu uso, que **devem** ser observadas, de modo a evitar acidentes de trânsito.

4.3.2 Restrições ao uso do amarelo intermitente

O amarelo intermitente em interseções, em períodos de baixa demanda veicular, **não deve** ser utilizado nos seguintes casos:

- ✓ onde pelo menos uma das vias tenha velocidade regulamentada acima de 60 km/h;
- ✓ onde a intervisibilidade dos condutores dos movimentos conflitantes não atende a distância de frenagem definida na seção 4.3.3;
- ✓ em sinalização semafórica que opera com três ou mais estágios veiculares;
- ✓ onde existirem duas ou mais linhas focais próximas, em sequência, no mesmo campo de visão do condutor, e uma delas não possa operar em amarelo intermitente, para não gerar dúvidas de interpretação do condutor.

Além das restrições apresentadas recomenda-se, por questões de segurança, que a decisão pelo uso do amarelo intermitente considere os seguintes fatores de risco:

- ✓ presença de pedestres na interseção;
- ✓ existência de duplo sentido de circulação em pelo menos uma das vias da interseção com velocidade regulamentada igual ou superior a 40 km/h, sem canteiro central ou com canteiro central com largura inferior a 5 m;
- ✓ circulação de caminhões e ônibus.

4.3.3 Critérios de utilização

Em relação às sinalizações semafóricas veiculares, o aspecto mais importante em uma interseção que opere em amarelo intermitente é a intervisibilidade dos condutores que se aproximam por movimentos conflitantes. Se a distância de frenagem for suficiente para que os condutores detenham seus veículos a tempo, o risco de colisões será minimizado. Essa distância é função da velocidade do veículo e da taxa de desaceleração, e assume os valores apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Distância de Frenagem

Velocidade (km/h)	30	40	50	60
Distância de Frenagem (m)[1]	12	21	33	47
Distância de Frenagem Mínima (m)[2]	9	16	25	35

Notas: [1]distância calculada utilizando taxa de desaceleração igual a 3,0 m/s^2 e tempo de percepção e reação igual a zero.
[2] distância utilizada na cidade de São Paulo para vias urbanas.

Na aplicação desse conceito, o técnico **deve** considerar a velocidade regulamentada da via.

A seguir, exemplos de aplicação deste método em alguns casos típicos, onde foi considerada a distância de frenagem mínima. A utilização do amarelo intermitente só é admitida se a área junto da interseção, limitada pela linha que liga a posição dos dois veículos (ver Figuras 4.17 a 4.20), estiver livre de obstáculos que dificultem a intervisibilidade dos condutores.

I) Situações em que as duas vias são mão única. Exemplos dessas situações são mostrados nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20.

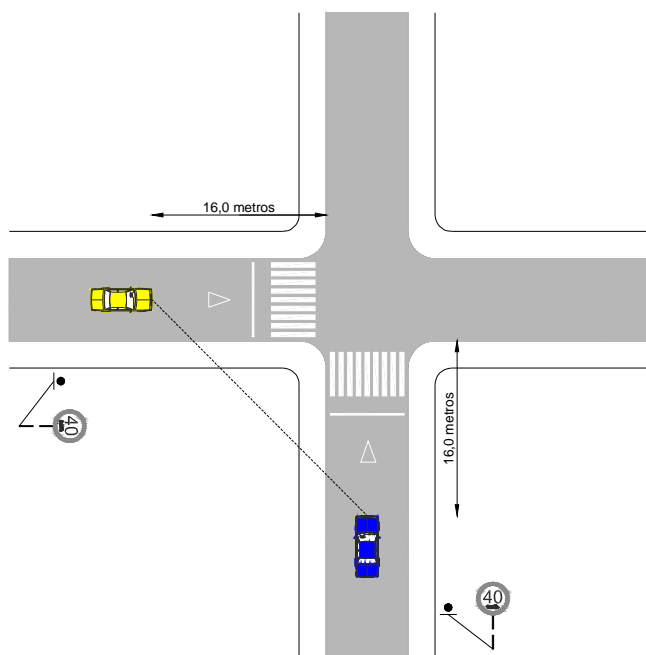



Figura 4.17: Interseção de duas vias com velocidade regulamentada de 40 km/h

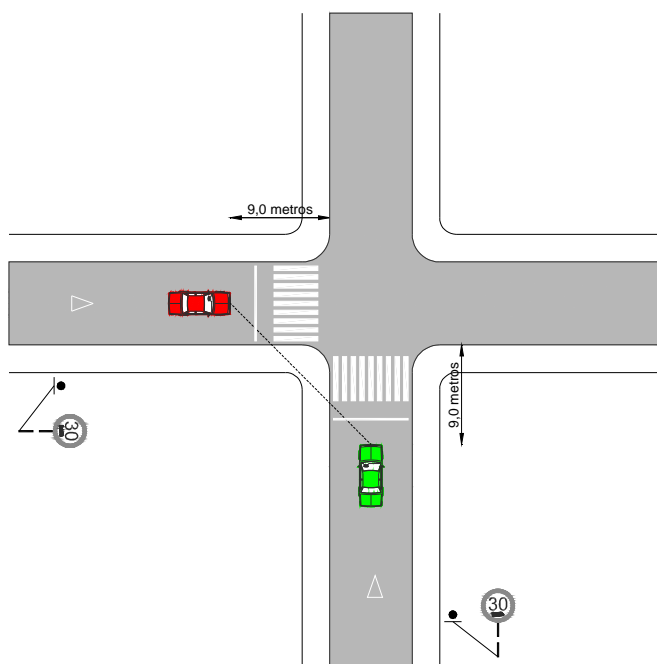



Figura 4.18: Interseção de duas vias com velocidade regulamentada de 30 km/h

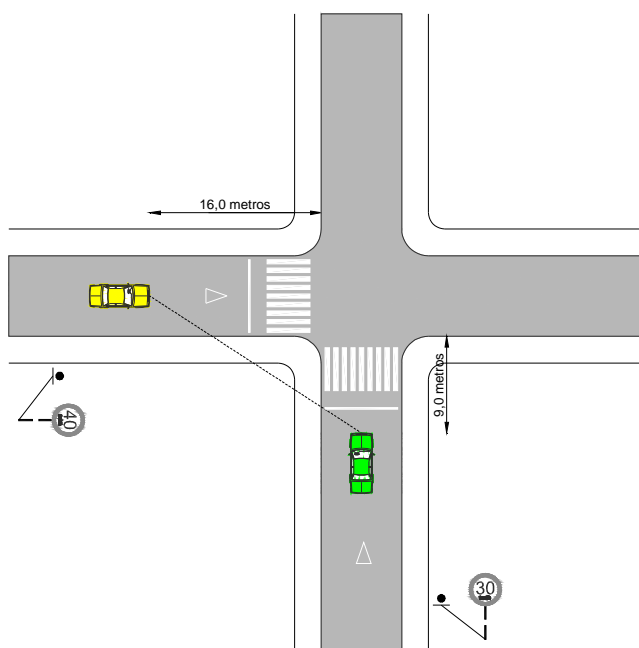



Figura 4.19: Interseção de vias com velocidades regulamentadas de 40 km/h e 30 km/h

35,0 metros
16,0 metros
60 km/h
40 km/h

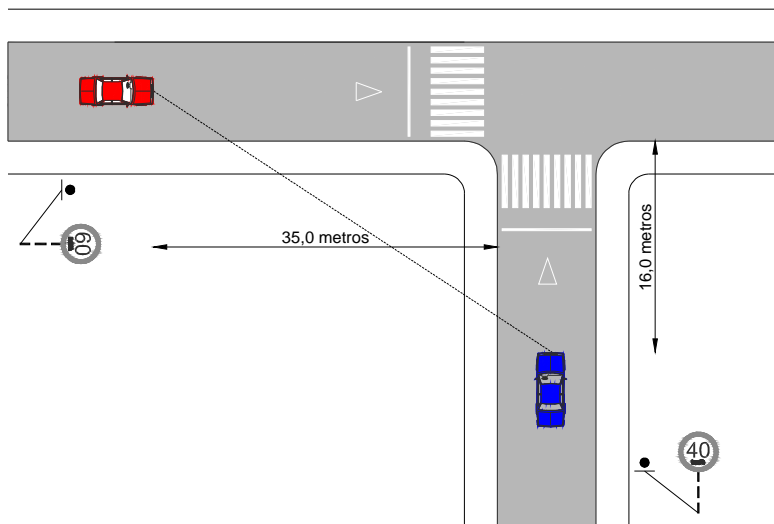



Figura 4.20: Interseção em "T", de vias com velocidades regulamentadas de 60 km/h e 40km/h

II) Situação em que pelo menos uma das vias é mão dupla. Exemplo dessa situação é mostrado na Figura 4.21.

40 km/h
40 km/h
16,0 metros
16,0 metros
50 km/h
25,0 metros
25,0 metros
50 km/h

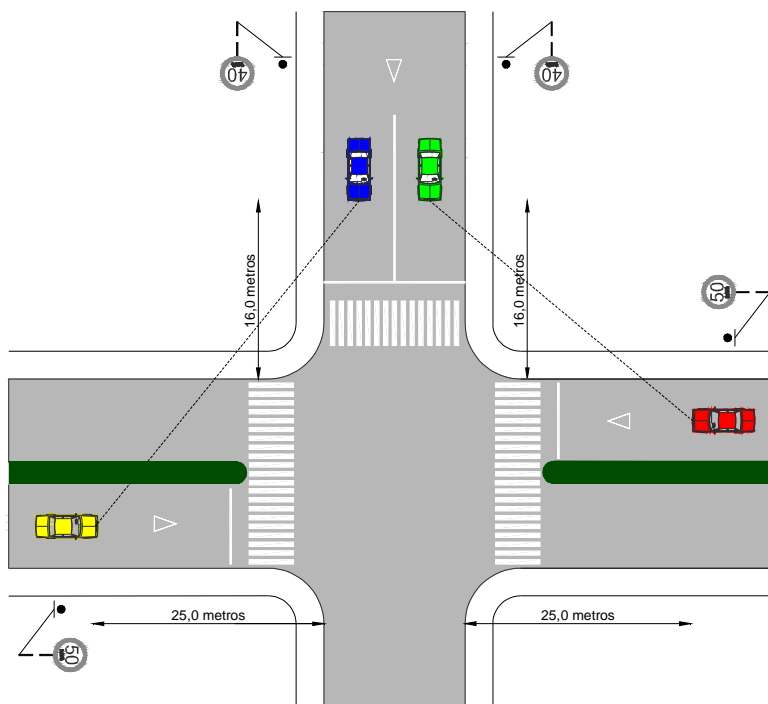



Figura 4.21: Interseção de vias de mão única e mão dupla com velocidades regulamentadas de 40 km/h e 50 km/h

4.3.4 Especificações das informações luminosas dos semáforos

Todos os grupos focais veiculares do local **devem** operar em amarelo intermitente e todos os grupos focais de pedestres **devem** permanecer apagados.

4.3.5 Considerações finais

A determinação da faixa de horário de abrangência do modo amarelo intermitente **deve** ser precedida de estudos específicos para cada local, que levem em conta o fluxo veicular, a composição do tráfego e o fluxo de pedestres. Recomenda-se que cada implementação do modo amarelo intermitente seja acompanhada em campo e que seus efeitos sejam monitorados por meio de vistorias periódicas e relatórios de acidentes.

Situações excepcionais podem surgir, decorrentes de particularidades de um determinado local. Nesses casos, a decisão de implementar ou retirar o modo amarelo intermitente **deverá** ser tomada pelo técnico, devidamente fundamentado.

4.4 Sinalização semafórica operando em tempo parcial

Denomina-se operação em tempo parcial aquela em que a sinalização semafórica opera normalmente em determinados períodos do dia e permanece com todas suas luzes apagadas em outros períodos.

Essa operação pode ser adotada quando a sinalização semafórica só é justificada em poucos períodos do dia. Por exemplo, para atender movimentos esporádicos como ocorre nos acessos a postos de bombeiros, quartéis e hospitais.

Em travessias de pedestres localizadas em meio de quadra, para atender movimentos esporádicos de pedestres, como nos acessos a escolas, a sinalização semafórica pode ser desligada.

A operação em tempo parcial **deve** vir acompanhada de sinalização vertical de advertência (A-14 com informação complementar), Na coluna ou braço do semáforo **deve** ser adotada sinalização especial de advertência. As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam exemplos desta sinalização.

Figura 4.22: Exemplo de sinalização de advertência a ser localizada em seção anterior à interseção

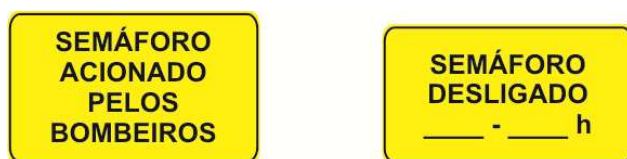



Figura 4.23: Exemplo de sinalização especial de advertência a ser localizada na coluna ou braço do semáforo que opera em tempo parcial

5 . CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONTROLE SEMAFÓRICO

Neste capítulo são apresentados os principais elementos relacionados à implantação da sinalização semafórica, dado que essa implantação foi justificada com base nos critérios definidos no Capítulo 4 deste Manual. O presente capítulo aborda os elementos básicos que caracterizam a concepção do controle semafórico, e apresenta as diferentes estratégias, tipos de controle e os modos de implementação do controle semafórico. Na seção final do capítulo é feita uma análise geral dos diferentes tipos de controle e operação apresentados.

5.1 Elementos básicos

Na definição do controle semafórico são empregados os termos apresentados a seguir.

a) Grupo de movimentos

É o conjunto de movimentos presentes em uma mesma aproximação que recebem simultaneamente o direito de passagem (ver Figura 5.1).

b) Grupo semafórico

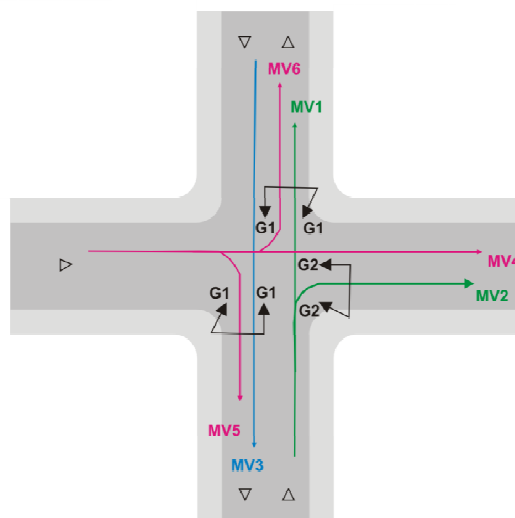
É o conjunto de semáforos (grupos focais) com indicações luminosas idênticas que controlam grupos de movimentos que recebem simultaneamente o direito de passagem (ver Figura 5.1)

Grupo de Movimentos 1: conjunto formado pelos movimentos MV1 e MV2
Grupo de Movimentos 2: conjunto formado pelo movimento MV3
Grupo de Movimentos 3: conjunto formado pelos movimentos MV4, MV5 e MV6
Grupo semafórico 1 (G1): conjunto de semáforos que controla os grupos de movimentos 1 e 2
Grupo semafórico 2 (G2): conjunto de semáforos que controla o grupo de movimentos 3

Figura 5.1: Ilustração do conceito de grupo de movimentos e grupo semafórico

c) Estágio

Denomina-se estágio o intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos recebem simultaneamente o direito de passagem. O estágio compreende o tempo de verde e o tempo de entreverdes que o segue.

d) Entreverdes

É o intervalo de tempo compreendido entre o final do verde de um estágio e o início do verde do estágio subsequente.

Para semáforos veiculares, o entreverdes é composto de um tempo de amarelo, acrescido de um tempo de vermelho geral sempre que necessário.

Para semáforos de pedestres, o entreverdes corresponde ao tempo de vermelho intermitente seguido de um tempo de vermelho geral.

e) Vermelho geral

É o intervalo de tempo entre o final do amarelo (ou do vermelho intermitente) de um estágio e o início do verde do próximo estágio.

f) Ciclo

Denomina-se ciclo a sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica. A duração do ciclo (tempo de ciclo) em uma interseção, ou seção de via, é definida pela soma dos tempos de todos os estágios programados para o controle do tráfego no local.

g) Intervalo luminoso

É o período de tempo em que permanece inalterada a configuração luminosa dos semáforos (grupos focais) que controlam o tráfego em um determinado local.

h) Plano semafórico

Denomina-se plano semafórico ao conjunto de elementos que caracteriza a programação da sinalização semafórica (ver Capítulo 6 do Manual) para uma interseção ou seção de via, num determinado período do dia. O diagrama de estágios e o de intervalos luminosos são partes integrantes do plano semafórico.

i) Diagrama de estágios

O diagrama de estágios é a representação gráfica da alocação dos movimentos que podem ser realizados (motorizados e não motorizados) em cada estágio do ciclo. O movimento de pedestres e/ou ciclistas só **deve** ser representado no diagrama de estágios quando for sinalizado por grupos focais específicos. A Figura 5.2 mostra um exemplo de diagrama de estágios para o controle dos movimentos apresentados na Figura 5.1.

Diagrama de estágios

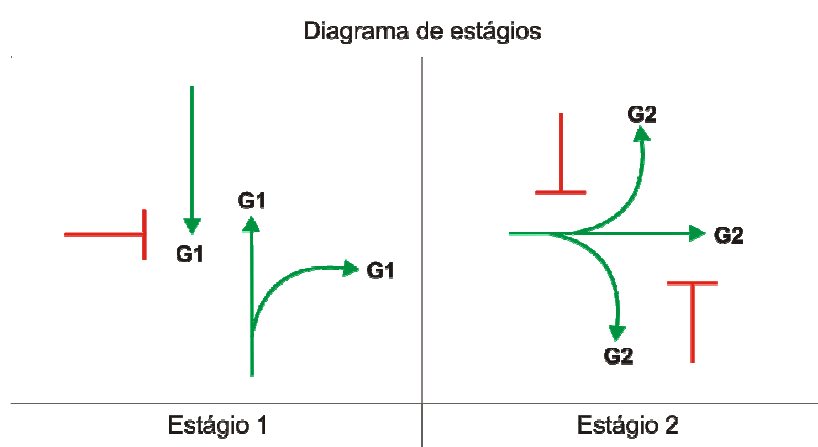
G1
G1
G1
G2
G2
G2

Estágio 1
Estágio 2

Figura 5.2: Exemplo de diagrama de estágios

j) Diagrama de intervalos luminosos ou diagrama de barras

Consiste na representação da duração e sequência dos intervalos luminosos e estágios por meio de barras horizontais, associando-os aos grupos semafóricos correspondentes. A Figura 5.3 apresenta um exemplo de diagrama de barras para o diagrama de estágios mostrado na Figura 5.2.

DIAGRAMA DE INTERVALOS LUMINOSOS						
INSTANTE (s)	0	30	34	36	74	78 80
G1						
G2						
INTERVALOS	1	2	3	4	5	6
DURAÇÃO (s)	30	4	2	38	4	2
% CICLO	38	5	2	48	5	2
ESTÁGIOS	1			2		

Figura 5.3: Exemplo de diagrama de intervalos luminosos

5.2 Controle e operação

O controle do tráfego em uma interseção ou seção de via por meio da sinalização semafórica pode ser realizado de acordo com diferentes tipos e estratégias e ser implementado por diferentes modos. Nesta seção as principais alternativas são apresentadas.

5.2.1 Tipos de controle

Basicamente, são dois os tipos de controle proporcionados pela sinalização semafórica. O primeiro é o controle em tempo fixo e o segundo o controle atuado pelo tráfego, que possuem níveis distintos de resposta a variações observadas nos movimentos controlados.

a) Tempo fixo

O controle em tempo fixo utiliza planos semafóricos calculados com base em dados de tráfego disponíveis, obtidos por contagens volumétricas e outros levantamentos de campo. As contagens volumétricas, sempre que possível, **devem** ser classificatórias. O controle pode ser efetuado com base em um único plano semafórico, ou na adoção de planos específicos para atender a demanda de tráfego histórica de períodos distintos do dia e de diferentes dias da semana.

Ao longo do período de ação de um plano semafórico, o tempo de ciclo, a sequência de estágios, a duração dos intervalos luminosos e a defasagem, no caso das redes semafóricas, são mantidos constantes. Os procedimentos para a determinação desses elementos são apresentados no Capítulo 7 do Manual.

b) Atuado

Os principais tipos de controle atuado pelo tráfego são: semiatuado e totalmente atuado.

b.1) Semiatuado

O controle semiatuado é, em geral, empregado em cruzamentos de vias de grande volume (vias principais) com vias de baixo volume de tráfego (vias secundárias).

Nesse tipo de controle a indicação verde é dada continuamente para os veículos da via principal, sendo interrompida quando detectores implantados nas aproximações da via secundária indicarem a presença de veículos motorizados.

Quando o controle semiatuado for empregado em travessias de pedestres ou ciclistas, a interrupção da indicação verde para os veículos da via principal ocorre quando as botoeiras forem acionadas.

O momento de interrupção do verde da via principal, a partir da detecção na via secundária ou do acionamento da botoeira, e a duração do tempo de verde a ser atribuído à via secundária, são definidos com base em parâmetros de programação específicos, estabelecidos de acordo com os procedimentos indicados no Capítulo 8 deste Manual.

b.2) Totalmente atuado

O controle totalmente atuado decorre do monitoramento da demanda de tráfego na interseção, mediante a implantação de detectores de tráfego em todas as suas aproximações, permitindo alterações nos tempos dos estágios.

O princípio básico do funcionamento em modo totalmente atuado é o da determinação do tempo de verde associado a cada estágio de sinalização, variando entre um valor mínimo e um valor máximo pré-estabelecidos.

Esse tipo de controle pode permitir o ajuste em tempo real dos valores de alguns dos parâmetros de programação, como por exemplo, a prioridade a ser dada para uma aproximação congestionada.

Sua implantação requer a definição desses e de outros parâmetros de programação, apresentados no Capítulo 8 deste Manual.

5.2.2 Estratégias de controle

Ao definir o controle semafórico o projetista **deve** decidir entre duas estratégias básicas de controle: controle isolado ou controle em rede.

a) Controle isolado

No controle semafórico isolado, cada interseção é controlada independentemente das demais, ou seja, não ocorre nenhum tipo de coordenação semafórica. Nesse caso, a definição da programação semafórica leva em conta apenas a demanda (histórica ou atual) do tráfego em todas as aproximações.

Essa estratégia pode comprometer seriamente o desempenho da circulação do tráfego em situações onde as interseções controladas por sinalização semafórica estiverem muito próximas entre si. As situações em que o uso do controle isolado não é recomendado são apresentadas no Capítulo 9.

b) Controle em rede

O controle em rede pode visar o aumento do desempenho da circulação do tráfego ao longo de uma rede aberta ou de uma rede fechada. O controle em rede aberta visa privilegiar a circulação do tráfego em uma via (ou em um percurso pré-estabelecido) e, por isso, é comumente referido como controle em corredor. O controle em rede fechada, que visa melhorar o desempenho geral do tráfego em uma determinada região, é denominado controle em área.

A estratégia de controle em rede permite a programação da sinalização semafórica visando não somente o desempenho do tráfego em cada interseção mas, sobretudo, o seu desempenho global ao longo do conjunto de cruzamentos. Esse desempenho é avaliado com base em critérios definidos pelo órgão gestor do trânsito, em função do propósito do controle.

A programação da sinalização semafórica operando em rede implica, além da determinação dos parâmetros necessários para a programação isolada, a definição de um parâmetro adicional, denominado defasagem. Esse parâmetro estabelece, tomando como base uma

referência temporal especificada, o momento de iniciar o verde de um estágio para cada interseção que integra a rede.

A definição da defasagem considera a chegada do tráfego nas aproximações na forma de pelotões. Tem-se, nesse caso, uma operação dita coordenada. Essa operação requer que a duração do ciclo seja a mesma para todas as interseções.

A determinação da defasagem é baseada no comportamento dos pelotões de veículos que circulam entre as interseções e, por isso, é relativamente complexa. A defasagem pode ser calculada manualmente ou com o auxílio de ferramentas computacionais. Existem diferentes programas computacionais comerciais para esse fim, tanto para o caso de operação em tempo fixo quanto de operação atuada pelo tráfego.

No caso do controle em rede aberta, procedimentos mais simples podem ser adotados, dentre os quais se destaca a utilização do diagrama espaço-tempo, apresentado no Capítulo 6 deste Manual.

As características do controle em rede são detalhadas no Capítulo 9 deste Manual.

5.2.3 Modos de operação

a) Controle local (descentralizado)

A programação semafórica é implementada diretamente no controlador, em campo. Qualquer alteração desejada na programação é feita usando os recursos disponíveis no controlador para a entrada manual de dados.

b) Controle centralizado

Nesse modo de operação, os controladores eletrônicos de tráfego são ligados a um computador central que gerencia a operação conjunta dos equipamentos.

O controle centralizado é utilizado para agilizar a operação do sistema de interseções semaforizadas, admitindo vários níveis de funcionamento.

No nível básico, são executadas as seguintes funções:

- ✓ monitoração do estado de funcionamento dos controladores e semáforos (grupos focais);
- ✓ implementação remota de alguns elementos da programação dos planos semafóricos.

Em outros níveis, quando da disponibilidade de sistemas de detecção de veículos, outras funções podem ser incorporadas, tais como:

- ✓ coleta de dados do tráfego;
- ✓ monitoração das condições de circulação;
- ✓ seleção e implementação de planos semafóricos em função da demanda;
- ✓ geração e implementação de planos semafóricos em função da demanda.

Quando da implantação do controle centralizado, as seguintes características **devem** ser, também, consideradas:

- ✓ o controle depende da confiabilidade do computador central e, por isso, são utilizadas algumas técnicas para evitar que problemas com o computador central comprometam as ações de controle;
- ✓ o controle centralizado requer uma rede de comunicação de alta confiabilidade e, portanto, de uma manutenção eficiente e eficaz;
- ✓ o controle centralizado requer a adoção de um protocolo de comunicação que facilite a sua futura expansão (recomenda-se a adoção de protocolo aberto);
- ✓ a operação do controle centralizado requer a atuação de equipe técnica especificamente treinada para esse fim;
- ✓ custo de implantação, operação e manutenção superior ao do modo local (descentralizado).

Devido às características do controle centralizado, recomenda-se que a decisão para sua adoção seja justificada por um estudo de viabilidade técnica, econômica e financeira.

5.3 Recursos computacionais para programação semafórica

Para operação de sistemas centralizados em tempo fixo e atuados, encontram-se disponíveis no mercado diversos programas.

O órgão gestor **deve** utilizar o programa que melhor atender suas necessidades de controle e sua disponibilidade de dados, de pessoal técnico e de equipamentos.

5.4 Análise comparativa das diferentes formas de controle

As principais vantagens e desvantagens dos controles em tempo fixo e atuado são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Vantagens e desvantagens do controle em tempo fixo e atuado

TIPO DE CONTROLE	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Tempo fixo	✓ A elaboração da programação e sua implantação em campo são simples no caso da operação isolada e em redes pequenas. ✓ Custo de implantação e operação inferior ao do controle atuado. ✓ Quando bem programado, levando em conta a variação do tráfego ao longo do dia, tem desempenho satisfatório.	✓ Planos semafóricos elaborados com dados de volume que não refletem a real situação do tráfego podem gerar excessivo atraso para veículos e pedestres. ✓ Requer coleta periódica de dados de tráfego para assegurar a qualidade dos planos semafóricos, o que implica em custos elevados. ✓ Pouco eficiente para o controle em locais, ou períodos do dia, em que o volume de tráfego sofre muitas variações. ✓ A determinação dos planos para a operação coordenada exige conhecimentos específicos.
Atuado	✓ Desempenho favorável no controle do tráfego em situações de volume muito variável. ✓ Minimiza tempos de verde ociosos. ✓ É o mais indicado para o controle de travessias de pedestres em meio de quadra, quando a sinalização semafórica for justificada. ✓ O controle atuado permite a omissão de estágios. Na situação de múltiplos estágios, o aspecto de segurança **deve** ser cuidadosamente observado.	✓ O custo de implantação e manutenção do sistema atuado é mais elevado do que o de tempo fixo. ✓ Nem todos os controladores podem operar em modo totalmente atuado. ✓ A instalação dos detectores é dispendiosa e requer inspeção e manutenção periódicas para sua adequada operação. ✓ A definição dos parâmetros para a operação dos controladores atuados, especialmente no controle totalmente atuado, exige conhecimentos específicos.

Com relação à comparação entre o modo de controle local (descentralizado) e centralizado, levando em conta as estratégias de controle (isolado e em rede) além dos aspectos referidos nas seções 5.2.2 e 5.2.3, cabe destacar:

- ✓ o modo de controle centralizado facilita a gestão semafórica, pois permite modificações rápidas na programação da sinalização semafórica, reduzindo os transtornos ocasionados pelas diversas ocorrências que obstruem o sistema viário, como colisões, veículos em pane, obras, desvios de tráfego etc.;

- ✓ o controle centralizado permite também que a programação semafórica seja aperfeiçoada sistematicamente, pois é mais conveniente planejar e aplicar as alterações pela central do que em campo;

- ✓ em modo centralizado são eliminados ou minimizados os problemas de erro no relógio do controlador;

- ✓ no modo centralizado, a rápida identificação de falhas no funcionamento dos equipamentos permite um atendimento mais eficiente das equipes de manutenção;

- ✓ o modo local tem custo de implantação e, geralmente, de manutenção inferior ao do modo centralizado.

6 . ELEMENTOS DA PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA

O presente capítulo aborda os principais elementos envolvidos na programação semafórica.

Para cada elemento considerado, é apresentado o conceito, a forma de determinação e exemplos de aplicação, quando for pertinente. A definição de alguns elementos já foi apresentada no Capítulo 5, mas será repetida neste capítulo a fim de facilitar as explicações.

Questões relacionadas à programação de semáforos para ciclistas serão tratadas em manual específico.

6.1 Volume de Tráfego

Denomina-se volume de tráfego (ou fluxo de tráfego) ao número de veículos ou pedestres que passa por uma dada seção de via durante o período de realização de uma contagem. No caso da programação semafórica, o volume de tráfego veicular é sempre determinado por sentido de circulação do tráfego, e é geralmente formado por diferentes tipos de veículos.

O volume de tráfego de cada movimento varia ao longo do tempo, sendo função da hora do dia, do dia da semana, da semana do mês, do mês e do ano em que esse movimento é observado. A variação temporal do volume de tráfego depende das características da cidade e do local específico.

Para efeito da programação semafórica, é importante analisar essa variação temporal do volume de tráfego, especialmente ao longo do dia e do dia da semana. Portanto, recomenda-se que as contagens sejam feitas, pelo menos, ao longo de um dia útil típico. A partir dessa análise é possível determinar, no caso da programação em tempo fixo, o número de planos semafóricos a serem calculados e o período do dia e dia da semana em que cada plano será implementado.

As Figuras 6.1 a 6.3 ilustram a variação do volume de tráfego de veículos pesquisado em uma via urbana, permitindo identificar os períodos de maior volume para cada unidade de tempo considerada.

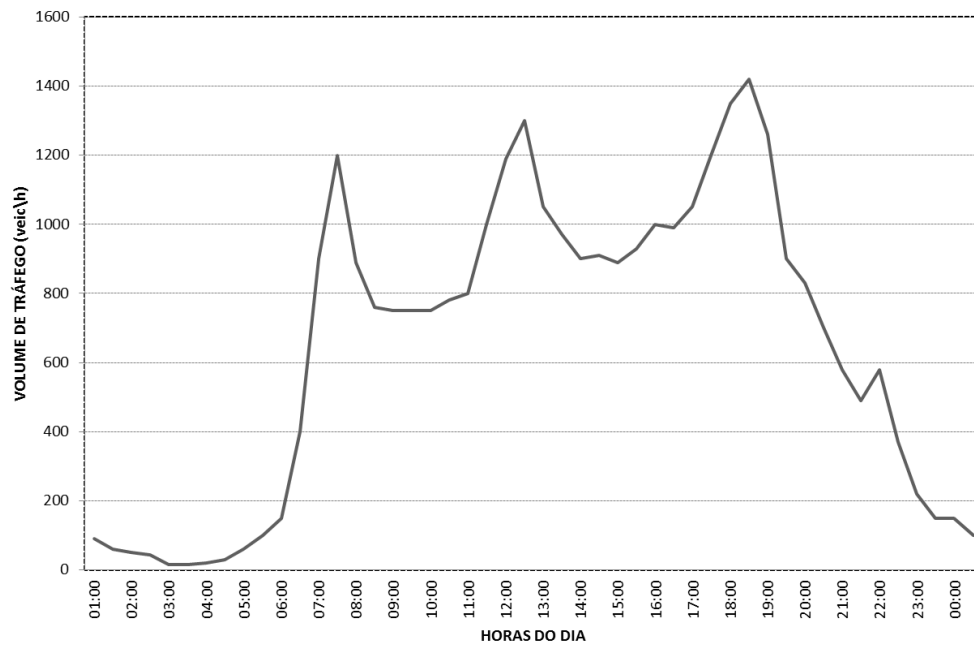



Figura 6.1: Exemplo da variação horária do volume em um dia útil

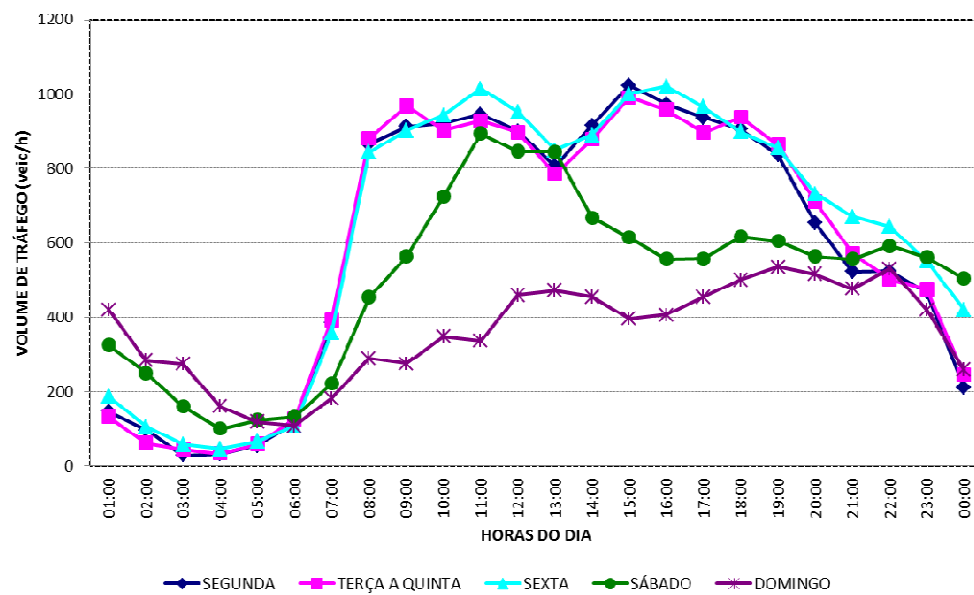



Figura 6.2: Exemplo da variação diária do volume ao longo da semana

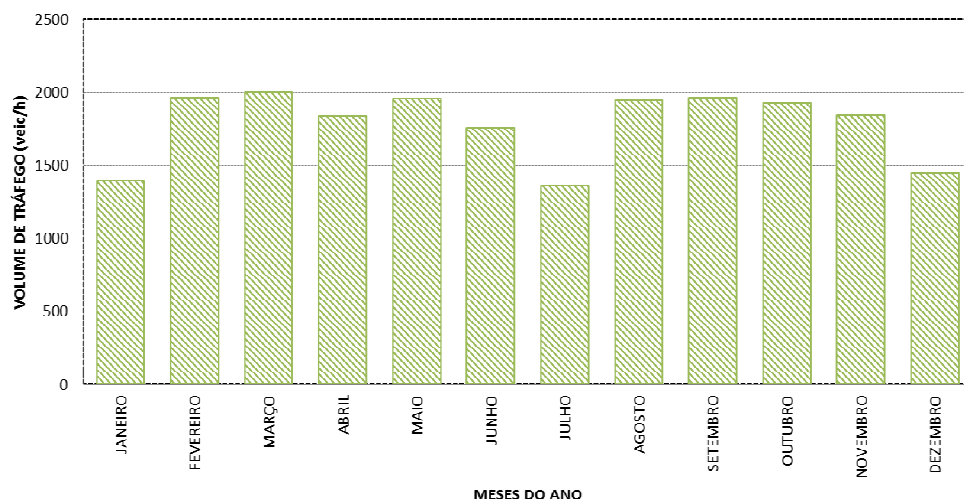



Figura 6.3: Exemplo da variação mensal do volume ao longo do ano

As contagens são usualmente registradas a cada 15 minutos e **devem** apresentar o número de pedestres e veículos de cada movimento.

No caso dos movimentos veiculares, a contagem **deve** ser classificada por tipo de veículo. Essa classificação se justifica pelo fato de veículos de tipos distintos apresentarem desempenho operacional diferenciado, que **deve** ser contemplado no cálculo da programação semafórica. Os tipos de veículos a serem considerados **devem** ser definidos na fase de planejamento dos trabalhos de coleta, em função das características do tráfego do local e do propósito da pesquisa. O Apêndice 3 traz um modelo de planilha utilizado para a contagem volumétrica classificada.

6.2 Volume de Tráfego Equivalente

Denomina-se volume de tráfego equivalente o volume de tráfego veicular expresso em termos de unidades de carros de passeio (ucp).

O desempenho de cada tipo de veículo difere em função de suas características. Os automóveis, referidos na literatura técnica como veículos leves, têm mais agilidade no trânsito se comparados aos veículos comerciais (ônibus, caminhões, carretas). Do mesmo modo, as motocicletas têm mais agilidade do que os automóveis.

Para se poder compor o volume de tráfego de uma via numa base única, utiliza-se o conceito de veículo equivalente. O veículo equivalente tem como valor de referência o automóvel, para o qual se adota fator de equivalência = 1,0 ucp (unidade de carro de passeio).

Para os demais tipos de veículos, o fator de equivalência de cada um reflete o desempenho de sua circulação no sistema viário em comparação com o desempenho do automóvel.

No caso particular da sinalização semafórica, o desempenho de um veículo está diretamente associado ao tempo de verde necessário para atendê-lo. Se, por exemplo, para passar por uma interseção semaforizada, certo tipo de veículo demorar o triplo do que demoraria um automóvel, então seu fator de equivalência é igual a 3.

Na Tabela 6.1 são apresentados os fatores de equivalência usualmente utilizados. A equivalência de veículos não previstos na tabela, tais como ônibus articulados, carretas e bicicletas, **deve** ser avaliada em estudos específicos.

Tabela 6.1: Fator de equivalência para diferentes tipos de veículos

TIPO	FATOR DE EQUIVALÊNCIA
Automóvel	1,00
Moto	0,33
Ônibus	2,00
Caminhão (2 eixos)	2,00
Caminhão (3 eixos)	3,00

Para efeito da programação semafórica, a Tabela 6.1 pode ser utilizada em situações onde não for possível medir o fluxo de saturação diretamente no local (Ver Apêndice 6).

6.3 Taxa de Fluxo

Denomina-se taxa de fluxo de um movimento o número de veículos projetado para o período de uma hora a partir dos volumes medidos em uma dada seção de via, durante intervalos de tempo inferiores a uma hora.

Essa taxa de fluxo pode ser projetada a partir do Volume de Tráfego ou do Volume de Tráfego Equivalente.

Na programação em tempo fixo, a taxa de fluxo é projetada, usualmente, com base no volume máximo observado nos intervalos de 15min ao longo do período já estabelecido para a duração do plano. **Deve** ser considerado o intervalo de 15min em que a soma dos movimentos em todas as aproximações da interseção é máxima.

Para planos com duração superior a duas horas, os volumes **devem** ser observados, no mínimo, ao longo das duas horas mais carregadas.

Na literatura técnica, o termo "fluxo de tráfego" é empregado como sinônimo de volume de tráfego, isto é, como o número de veículos ou pedestres que passa por uma dada seção de via durante o período de realização de uma contagem. Em alguns casos, esse termo também é usado como sinônimo de taxa de fluxo. Por isso, é importante que o técnico esteja atento para distinguir em qual dos dois sentidos o termo fluxo está sendo empregado: se é o volume efetivamente observado num intervalo ou se é sua projeção para o período de uma hora (correspondendo à taxa de fluxo).

6.4 Fluxo de Saturação e Tempo Perdido de um ciclo

6.4.1 Fluxo de saturação

O Fluxo de Saturação de um grupo de movimentos corresponde ao número máximo de veículos que poderia passar em uma aproximação controlada por sinalização semafórica no caso dessa aproximação receber indicação verde durante uma hora inteira. É representado pela máxima taxa de fluxo de tráfego observada em períodos saturados, como ilustram as Figuras 6.4 e 6.5.

O Fluxo de Saturação é afetado pelas condições da via, do tráfego e do ambiente. Em relação às condições da via, os fatores mais importantes são a topografia, geometria, o número e a largura das faixas, e o estado do pavimento. Em função dessas condições, seu valor em geral varia entre 1600 e 2000 unidades de carro de passeio por hora por faixa.

Quanto às condições do tráfego, o fluxo de saturação é influenciado pela composição do tráfego veicular (tipos de veículos), pelo volume de pedestres e por eventuais interferências tais como pontos de ônibus próximos ou estacionamentos.

6.4.2 Tempo perdido de um ciclo

No que diz respeito às características ambientais, a iluminação e a chuva são os fatores mais relevantes.

Para efeito da programação semafórica, Tempo Perdido de um ciclo, ou simplesmente Tempo Perdido Total, é a parte do ciclo que não é efetivamente utilizada pelos veículos. Sua ocorrência pode ter duas causas:

a) **Existência de estágio de pedestres.** Durante um estágio exclusivo para pedestres, a passagem dos veículos na interseção é interrompida.

b) **Alternância de passagem entre as correntes de tráfego veicular.** Em toda troca de estágio, por razões de segurança, ocorre um período de entreverdes durante o qual o fluxo dos veículos que estão perdendo o direito de passagem vai se reduzindo até chegar a zero. Além disso, demora certo tempo até que o fluxo dos veículos que estão ganhando o direito de passagem atinja o valor do fluxo de saturação. Durante estes dois intervalos, portanto, existe uma perda representada pela diferença entre o número de veículos que poderia ter passado, se o fluxo se mantivesse no patamar do fluxo de saturação, e o número de veículos que conseguiu efetivamente passar.

A Figura 6.4 mostra o que ocorre nesses dois intervalos e auxilia o entendimento da formulação matemática da questão. O segmento de reta AB está posicionado de forma que as áreas das duas figuras hachuradas no início do verde sejam iguais entre si.

Analogamente, o segmento de reta CD iguala as duas áreas hachuradas durante o entreverdes. Dessa forma, pode-se afirmar que a situação real equivale àquela em que o fluxo é nulo durante os intervalos tpi (tempo perdido no início do estágio) e tpf (tempo perdido no final do estágio) e igual ao fluxo de saturação durante o resto do estágio.

O tempo perdido total, representado por Tp, será calculado, então, com o uso da Equação 6.1.

$$T_p = t_{ep} + \sum_{i=1}^{n} \left(t_{pin_i} + t_{pfn_i}\right) \qquad (6.1)$$

em que,

T_p - tempo perdido total, em segundos;

t_{ep} – tempo de estágio exclusivo para pedestres, caso existente, em segundos;

n – número de estágios veiculares existentes;

t_{pin_i} – tempo perdido no início do estágio *i*, em segundos;

t_{pfn_i} – tempo perdido no final do estágio *i*, em segundos.

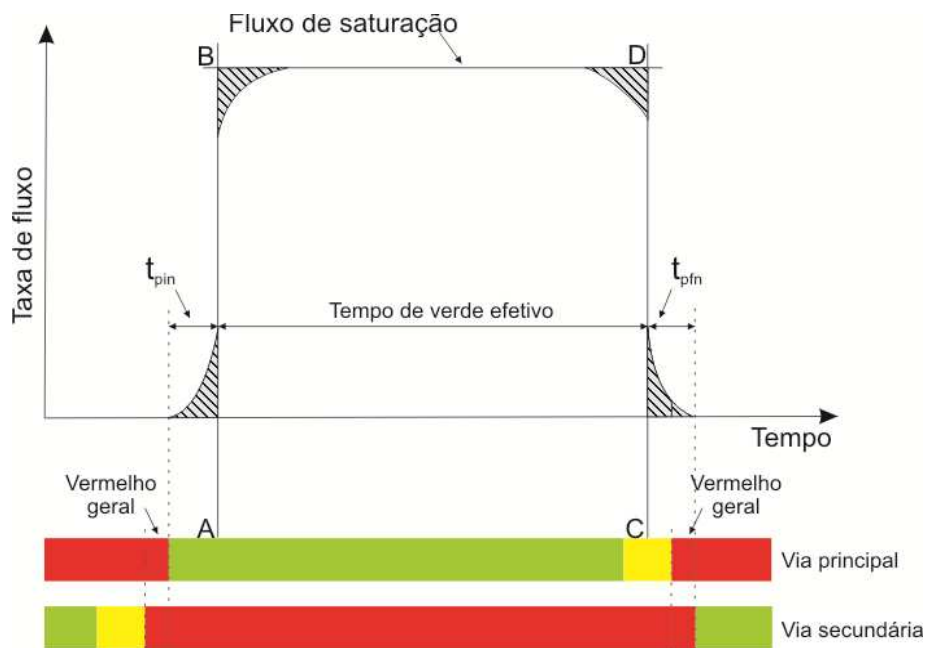



Figura 6.4: Fluxo de saturação e tempos perdidos em estágio saturado

A Figura 6.5 apresenta a condição mais comumente encontrada nas vias em que a passagem dos veículos à taxa de fluxo de saturação ocorre apenas durante um tempo inferior ao tempo de verde, até que a fila que se formou durante o vermelho seja dissipada. Após esse período verifica-se que o fluxo muda para um patamar inferior, que corresponde à demanda de veículos que continuam chegando à aproximação.

Nessa condição, ainda é possível medir diretamente no local o fluxo de saturação e o tempo perdido no início do estágio, mas não é mais possível medir o tempo perdido no final.

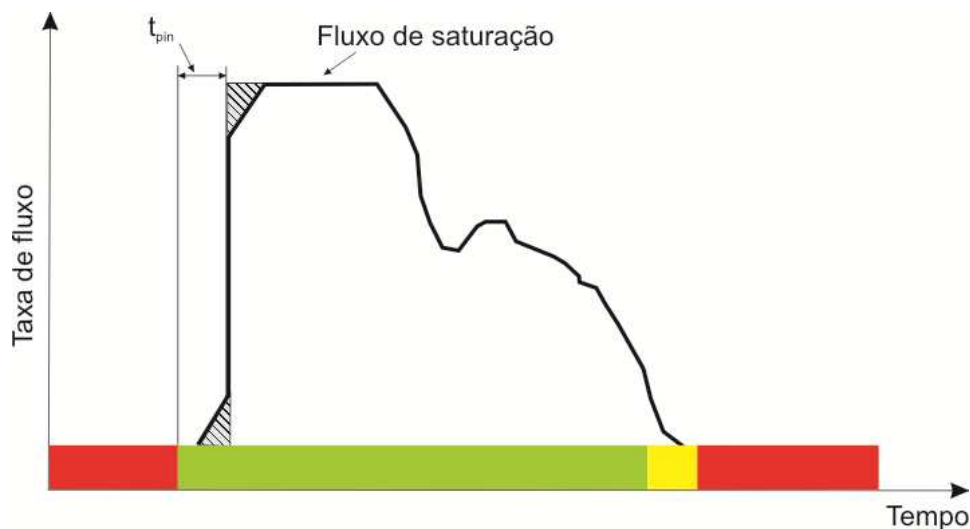



Figura 6.5: Fluxo de saturação e tempo perdido inicial em estágio não saturado

É recomendável medir diretamente no local os valores do fluxo de saturação e dos tempos perdidos inicial e final. O Apêndice 6 apresenta métodos para a medição desses parâmetros, além de procedimentos para estimá-los quando a medição não for possível.

6.5 Taxa de ocupação

Denomina-se taxa de ocupação de um grupo de movimentos, representada pelo símbolo *y*, a relação entre sua taxa de fluxo e o respectivo fluxo de saturação, expressos na mesma unidade. É calculada pela Equação 6.2.

$$y = \frac{F}{FS} \qquad (6.2)$$

em que,

y – taxa de ocupação;

F – taxa de fluxo do grupo de movimentos, em veículos por hora, ou ucp por hora;

FS – fluxo de saturação do grupo de movimentos, em veículos por hora ou ucp por hora.

6.6 Grupo de Movimentos Crítico

Denomina-se grupo de movimentos crítico de um estágio o grupo de movimentos que apresenta maior taxa de ocupação dentre aqueles que recebem verde nesse estágio. O tempo de ciclo e os tempos de verde são calculados em função das taxas de ocupação somente dos grupos de movimentos críticos.

Quando um grupo de movimentos é servido em mais de um estágio, a determinação do tempo de ciclo e tempos de verde segue procedimento especial, apresentado no Exemplo 7.2.3 do Capítulo 7.

6.7 Entreverdes

O entreverdes é a parte do estágio programada após o fim do intervalo de verde, com o propósito de evitar acidentes entre os usuários que estão perdendo seu direito de passagem e aqueles que vão passar a adquiri-lo no estágio subsequente.

No caso dos grupos focais veiculares, compõe-se do intervalo de amarelo seguido, sempre que possível, do intervalo de vermelho geral. No caso de grupos focais de pedestres consiste no intervalo de vermelho intermitente seguido do intervalo de vermelho geral.

6.7.1 Entreverdes para os veículos

Este tempo tem a função de assegurar a travessia da interseção por veículos que, ao receberem a indicação amarela, se encontrem a uma distância da linha de retenção insuficiente para parar com segurança.

Neste caso, o tempo de entreverdes **deve** ser suficiente para que o veículo possa tanto percorrer a distância até a linha de retenção (d_1 na Figura 6.6) como concluir a travessia abandonando a área de conflito (d_2 na mesma figura) antes que os veículos ou pedestres dos movimentos conflitantes recebam direito de passagem.

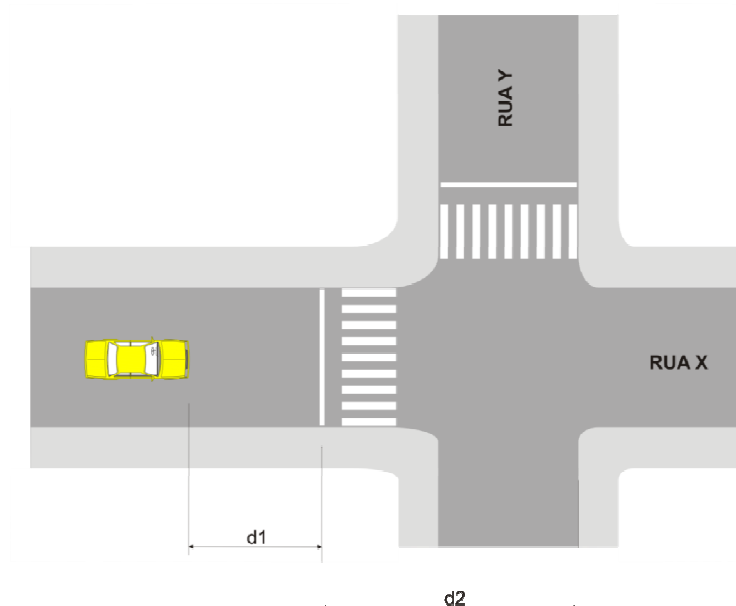



Figura 6.6: Distâncias percorridas pelo veículo junto à aproximação

A partir deste conceito a Equação 6.3 calcula o tempo de entreverdes necessário para atender o veículo que estiver na posição mais desfavorável no instante em que seu intervalo verde é encerrado.

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)} + \frac{d_2 + c}{v} \qquad (6.3)$$

em que,

t_{ent} – tempo de entreverdes para o grupo focal de veículos; em segundos;

t_{pr} **-** tempo de percepção e reação do condutor, em segundos;

v – velocidade do veículo, em m/s;

a_{ad} – máxima taxa de frenagem admissível em via plana, em m/s^2;

i – inclinação da via na aproximação, sendo "+" em rampas ascendentes e "**-**" em rampas descendentes (m/m);

g – aceleração da gravidade (9,8 m/s^2);

d_2 – extensão da trajetória do veículo entre a linha de retenção e o término da área de conflito, em metros;

c – comprimento do veículo, em metros.

Ao compor o tempo de entreverdes, o tempo de amarelo (t_{am}) **deve** ser igual à soma das duas primeiras parcelas da Equação 6.3 e o tempo de vermelho geral (t_{vg}) **deve** ser igual à última. Nesse caso, esses tempos serão calculados segundo as Equações 6.4 e 6.5.

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)} \qquad (6.4)$$

e

$$t_{vg} = \frac{d_2 + c}{v} \qquad (6.5)$$

em que t_{am} representa o tempo de amarelo enquanto t_{vg} indica o tempo de vermelho geral.

Usualmente, adotam-se os seguintes valores para as grandezas envolvidas:

t_{pr} = 1,0 s;

v= velocidade regulamentada da via, expressa em m/s;

a_{ad} = 3,0 m/s^2;

c = 5 m (onde o fluxo é predominantemente constituído por automóveis).

Em situações em que o local apresente condições particulares de topografia ou composição do tráfego, estes valores **devem** ser substituídos por outros levantados diretamente em campo.

A máxima taxa de frenagem admissível varia em função das características dos veículos e da via. Assim, o valor usual de 3,0 m/s^2 representa condições médias observadas na prática. Para situações especiais, o técnico **deve** realizar estudos para definir a taxa a ser usada no projeto.

Por razões de segurança, em vias com velocidade máxima regulamentada igual ou inferior a 40 km/h, o tempo de amarelo **não deve** ser inferior a 3s, independentemente do valor do vermelho geral.

Analogamente, em vias com velocidade máxima regulamentada igual a 50 ou 60 km/h, o tempo de amarelo **não deve** ser inferior a 4s. Para vias com velocidade regulamentada igual a 70 km/h, o tempo mínimo de amarelo **deve** ser igual a 5s.

Para todas as velocidades máximas regulamentadas, o tempo de amarelo não deve ser superior a 5s. Portanto, se o valor calculado pela equação 6.4 for superior a 5s, deve ser adotado t_{am} = 5s e o restante do entreverdes concedido na forma de vermelho geral.

No caso de controladores antigos, em que não seja possível adotar o vermelho geral, o tempo mínimo de amarelo **deve** corresponder ao tempo total de entreverdes, e **deve** ser calculado de acordo com a Equação 6.3. No entanto, se esse valor for superior a 5s, **deve** ser adotado t_{am} = 5s e o restante do entreverdes concedido na forma de vermelho geral, mesmo que isso implique na troca do controlador.

O vermelho geral do estágio veicular deve ser acrescido de, no mínimo, 1 segundo sempre que o estágio subsequente atender travessia de pedestres.

6.7.2 Entreverdes para os pedestres

O entreverdes para os pedestres é composto basicamente pelos intervalos de vermelho intermitente e de vermelho geral. O intervalo de vermelho intermitente **deve** ser suficiente para que o pedestre que iniciou sua travessia no intervalo de verde possa concluí-la com segurança na velocidade normal de caminhada. O intervalo de vermelho geral deve ter duração mínima de 1 segundo.

A Equação 6.6 calcula o tempo do intervalo de vermelho intermitente necessário para atender o pedestre que estiver na posição mais desfavorável no instante em que seu intervalo verde é encerrado.

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{l}{v_p} \qquad (6.6)$$

em que,

t_{ent} – tempo do intervalo de vermelho intermitente para o grupo focal de pedestres, em segundos;

t_{pr} - tempo de percepção e reação do pedestre, em segundos;

l – extensão da travessia, em metros;

v_p – velocidade do pedestre, em m/s.

Usualmente, adota-se o tempo de percepção e reação do pedestre igual a 1,0 s e a sua velocidade igual a 1,2 m/s.

Em situações específicas, em que o local é utilizado sistematicamente por pedestres com mobilidade reduzida ou quando, devido às características do local, são verificados deslocamentos mais lentos, estes valores **devem** ser substituídos por outros levantados diretamente em campo.

Considerando que o tempo de entreverdes calculado conforme a Equação 6.6 é suficiente para garantir a realização da travessia, o tempo de verde deve ser definido de acordo com o estabelecido na seção 6.14.

6.8 Grau de Saturação

Grau de saturação de um grupo de movimentos, representado pelo símbolo *x*, é uma grandeza obtida pela relação entre a taxa de fluxo do grupo de movimentos e a capacidade para o atendimento desse fluxo durante o período de uma hora.

O grau de saturação é um indicador que reflete se existe reserva de capacidade para o atendimento do grupo de movimentos, ou se a aproximação correspondente está próxima da saturação, e é calculado pela expressão mostrada na Equação 6.7.

$$x = \frac{F}{Cap} \qquad (6.7)$$

em que,

x – grau de saturação;

F – taxa de fluxo do grupo de movimentos, em veículos por hora, ou ucp por hora;

Cap – capacidade, em veículos por hora, ou ucp por hora (ver item 6.11).

A Figura 6.7 ilustra o conceito de determinação do grau de saturação, com base na observação deum ciclo. A área hachurada representa o volume que passou durante um ciclo e, nesse exemplo, é inferior à área do retângulo, que representa o máximo volume que pode passar no ciclo (capacidade de atendimento no ciclo). Quanto maior for a relação entre o volume que passou e o máximo que pode passar, mais próxima da saturação está a aproximação correspondente no referido ciclo.

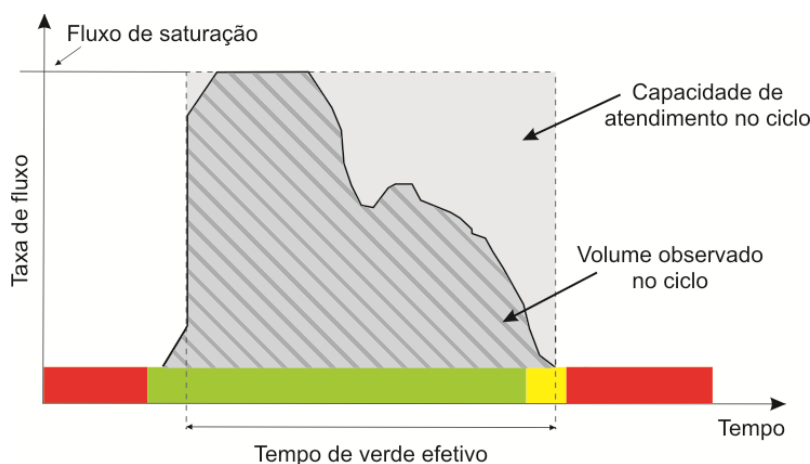



Figura 6.7: Ilustração do conceito de determinação do grau de saturação

6.9 Tempo de Ciclo

Denomina-se ciclo a sequência completa das indicações de uma sinalização semafórica. O tempo de ciclo é o tempo necessário para que um ciclo inteiro seja cumprido em uma interseção, ou seção de via, e é determinado pela soma dos tempos de todos os estágios programados para o controle do tráfego no local.

Como valores altos para o tempo de ciclo implicam em tempos de espera muito elevados, nas situações comuns de controle esse valor não **deve** superar 120s. Em situações excepcionais de tráfego e/ou de geometria da interseção, pode ser necessário adotar tempos de ciclo maiores. Nesses casos **deve** ser dada especial atenção ao tratamento para a travessia dos pedestres no local, adotando-se medidas como implantação de travessia em etapas, travessia em desnível, dentre outras soluções possíveis.

Apresenta-se a seguir dois métodos para calcular o tempo de ciclo: Método do grau de saturação máximo e Método de Webster.

6.9.1 Método do grau de saturação máximo

É baseado no grau de saturação máximo definido pelo projetista para cada grupo de movimentos no período dos 15 minutos de volume máximo, conforme indicado no item 6.3.

O método inicia pelo cálculo da fração de verde necessária para cada estágio, por meio da Equação 6.8.

$$p_i = \frac{y_i}{xm_i} \qquad (6.8)$$

em que,

p_i – fração de verde requerida para o estágio i;

y_i – taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i;

xm_i – grau de saturação máximo definido para o grupo de movimentos crítico do estágio i.

A partir do cálculo da fração de verde para cada estágio, o tempo de ciclo é calculado por meio da Equação 6.9.

$$t_c = \frac{T_p}{1 - \sum_{i=1}^{n} p_i} \qquad (6.9)$$

em que,

t_c – tempo de ciclo, em segundos;

T_p – tempo perdido total, em segundos;

p_i – fração de verde requerida para o estágio i;

n – número de estágios.

No caso particular em que se deseja adotar o mesmo grau de saturação xm para os grupos de movimentos críticos de todos os estágios, a determinação do tempo de ciclo é feita por meio da Equação 6.10, que é um caso particular da Equação 6.9.

$$t_c = \frac{xm\, T_p}{xm - \sum_{i=1}^{n} y_i} \qquad (6.10)$$

Usualmente, adotam-se valores de grau de saturação compreendidos entre 0,75 e 0,90.

Valores superiores a 0,90 podem conduzir a uma reserva de capacidade insuficiente para absorver tanto a flutuação aleatória do trânsito como a redução ocasional do fluxo de saturação devido à ocorrência de incidentes. Por outro lado, valores inferiores a 0,75 podem conduzir a tempos de ciclo injustificadamente elevados.

6.9.2 Método de Webster

Calcula o tempo de ciclo, denominado pelo autor de tempo de ciclo ótimo, de forma que o tempo de espera veicular seja mínimo. Este método pressupõe chegadas aleatórias dos veículos nas aproximações e, portanto, sua utilização não é recomendada quando essa condição não se verifica. Também no caso de interseções com alto grau de saturação, a utilização desse método não é recomendável.

O tempo de ciclo ótimo é calculado por meio da Equação 6.11.

$$t_{co} = \frac{1{,}5 \times T_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i} \qquad (6.11)$$

em que,

t_{co} – tempo de ciclo ótimo, em segundos;

T_p – tempo perdido total, em segundos;

y_i – taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i;

n – número de estágios.

De acordo com Webster, tempos de ciclo na faixa de 0,75 a 1,5 do tempo de ciclo ótimo produzem atrasos médios por veículos no máximo 20 % superiores ao valor do atraso obtido com o tempo de ciclo ótimo.

6.10 Tempo de verde real e tempo de verde efetivo

Denomina-se tempo de verde real de um estágio a duração do período em que o respectivo grupo focal permanece em verde, durante um ciclo.

Denomina-se tempo de verde efetivo de um estágio ao tempo de verde do estágio que seria efetivamente utilizado pelo fluxo do grupo de movimentos crítico, se este fosse descarregado com valor igual ao fluxo de saturação. Esse conceito somente se aplica no caso de operação saturada (ver Figura 6.4).

O tempo de verde efetivo é calculado pela Equação 6.12, quando o ciclo for determinado pelo Método do grau de saturação máximo, ou pela Equação 6.13, no caso da utilização do Método de Webster.

$$t_{v,efet,i} = p_i \times t_c \qquad (6.12)$$

em que,

$t_{v,ef,i}$ – tempo de verde efetivo do estágio *i*, em segundos;

t_c – tempo de ciclo, em segundos;

p_i – fração de verde requerida para o estágio *i*.

$$t_{v,efet,i} = (t_c - T_p) \times \frac{y_i}{\sum_{i=1}^{n} y_i} \qquad (6.13)$$

em que,

$t_{v,ef,i}$ – tempo de verde efetivo do estágio *i*, em segundos;

t_c – tempo de ciclo, em segundos;

T_p – tempo perdido total, em segundos;

y_i – taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio *i*;

n – número de estágios.

A Equação 6.14 relaciona o tempo de verde real ao tempo de verde efetivo.

$$t_{v,real} = t_{v,efet} - t_{ent} + t_{pin} + t_{pfn} \qquad (6.14)$$

em que,

$t_{v,real}$ – tempo de verde real, em segundos;

$t_{v,efet}$– tempo de verde efetivo, em segundos;

t_{ent} – tempo de entreverdes, em segundos;

t_{pin}– tempo perdido no início, em segundos;

t_{pfn} – tempo perdido no final, em segundos.

No caso de estágio de pedestres, o tempo de verde efetivo é igual ao tempo de verde real. O valor mínimo do tempo de verde do estágio de pedestres **deve** ser igual a quatro segundos, sendo o valor recomendado igual a sete segundos. Características específicas da travessia ou do fluxo de pedestres podem recomendar a adoção de valores superiores a sete segundos para o tempo de verde.

No caso em que a travessia de pedestres é servida durante um estágio veicular (travessia tipo carona), o tempo de verde do grupo focal do pedestre é determinado em função da duração desse estágio. O tempo de verde do grupo focal do pedestre será igual ao tempo do estágio veicular subtraído do tempo de vermelho intermitente (acrescido ou não de um tempo de vermelho geral) que deve ser igual ao tempo necessário para a travessia. Nesse caso, o tempo de verde para pedestres deve atender os valores mínimos estabelecidos no parágrafo anterior, podendo excedê-los.

Em todos os casos, o tempo de vermelho intermitente **deve** ser dimensionado de acordo com a Equação 6.6 (ver item 6.7.2), para garantir a travessia segura dos pedestres.

6.11 Capacidade

Denomina-se capacidade de um grupo de movimentos o número máximo de veículos que pode passar em uma aproximação controlada por sinalização semafórica durante uma hora, considerando-se a sua operação normal. É determinada pela Equação 6.15.

$$Cap = FS \times \frac{t_{v,efet}}{t_c} \qquad (6.15)$$

em que,

Cap – capacidade, em veículos por hora ou ucp/h;

FS – fluxo de saturação, em veículos por hora ou ucp/h;

$t_{v,efet}$ – tempo de verde efetivo, em segundos;

t_c – tempo de ciclo, em segundos.

O conceito de capacidade está representado na Figura 6.7.

6.12 Pelotões

A retenção dos veículos durante o intervalo vermelho faz com que se agrupem até serem liberados durante o verde. Quando liberados, eles iniciam a circulação em grupos compactos, denominados pelotões. À medida que o pelotão vai se afastando da linha de retenção, tende a se dispersar, processo denominado dispersão de pelotões. A Figura 6.8 ilustra esse processo ao longo de um segmento viário localizado a jusante de uma faixa de pedestres controlada por sinalização semafórica.

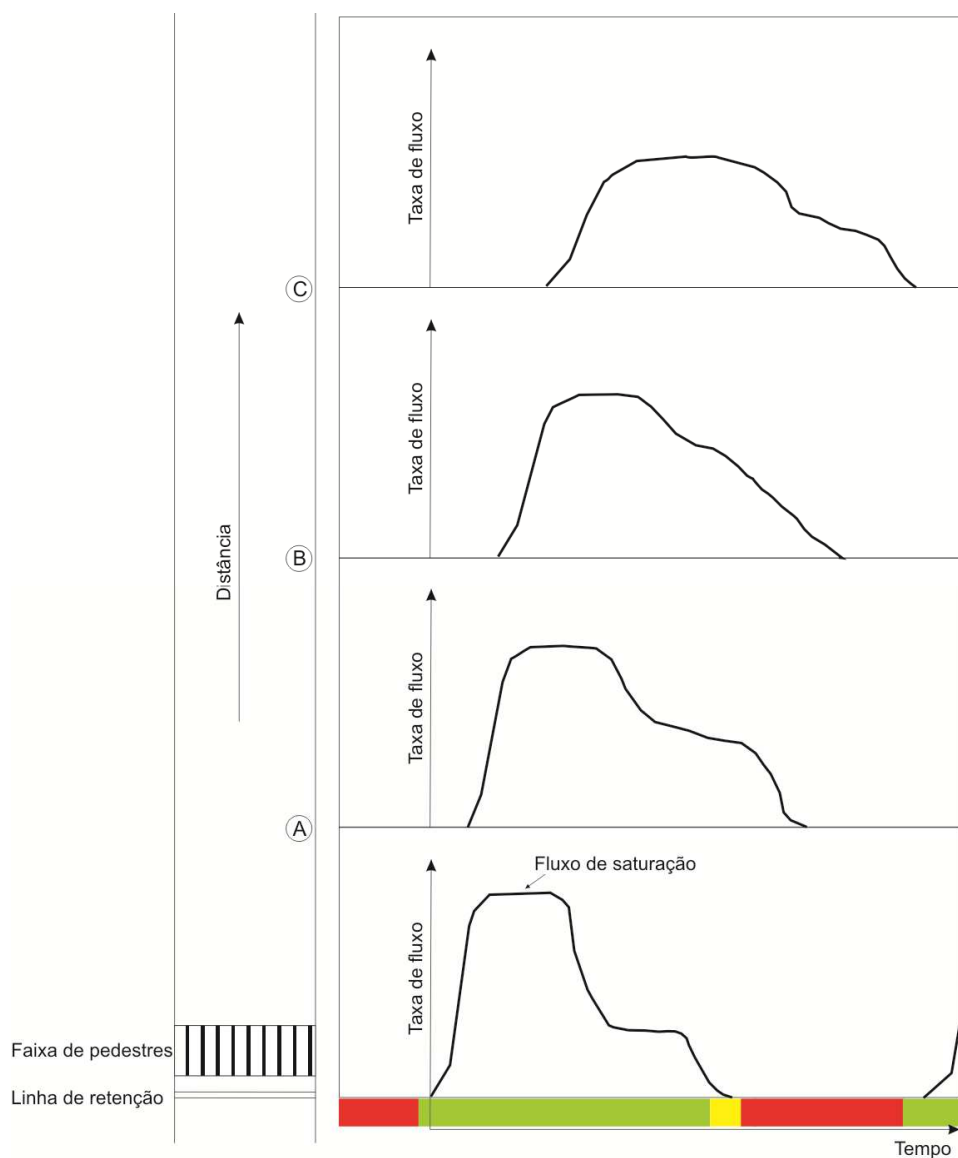



Figura 6.8: Dispersão de pelotões ao longo de um segmento viário

6.13 Defasagem

Considerando-se uma corrente de tráfego que passa por dois locais semaforizados pertencentes à mesma rede, denomina-se defasagem o intervalo de tempo decorrido entre o início do verde que essa corrente recebe nos dois locais.

Dois locais que pertencem à mesma rede **devem** operar no mesmo tempo de ciclo, ou na situação particular em que o tempo de ciclo de um local é submúltiplo do existente no outro.

A Figura 6.9 apresenta diagramas espaço-tempo, que ilustram a defasagem entre sinalizações semafóricas ao longo de uma via arterial, tendo como referência o início do verde da interseção mais à esquerda.

(a) Via de mão única

(s)

CICLO: 104s

208 182 156 130 104 78 52 26 0

VELOCIDADE: 45 KM/H

16s (def.) 15s (def.) 15s (def.)

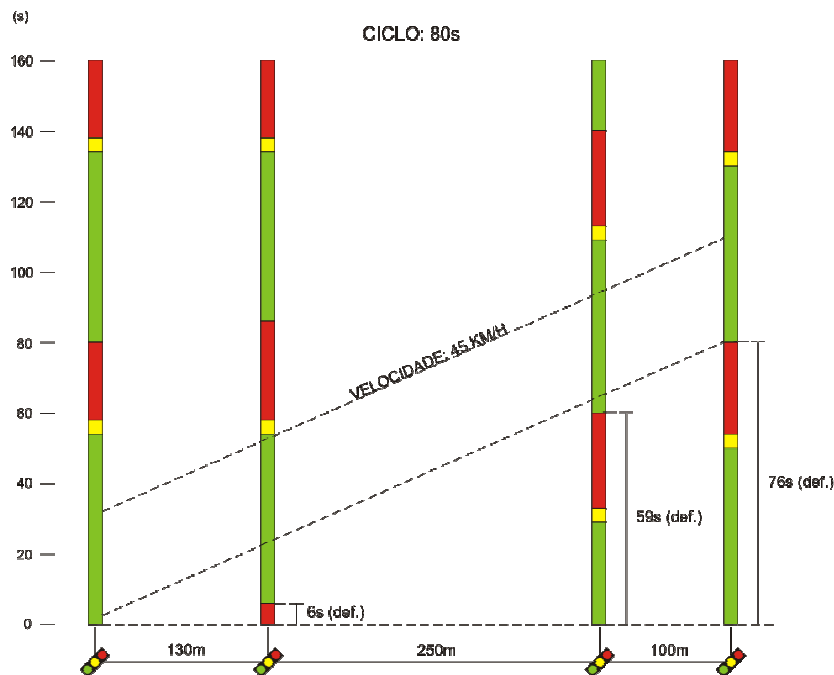
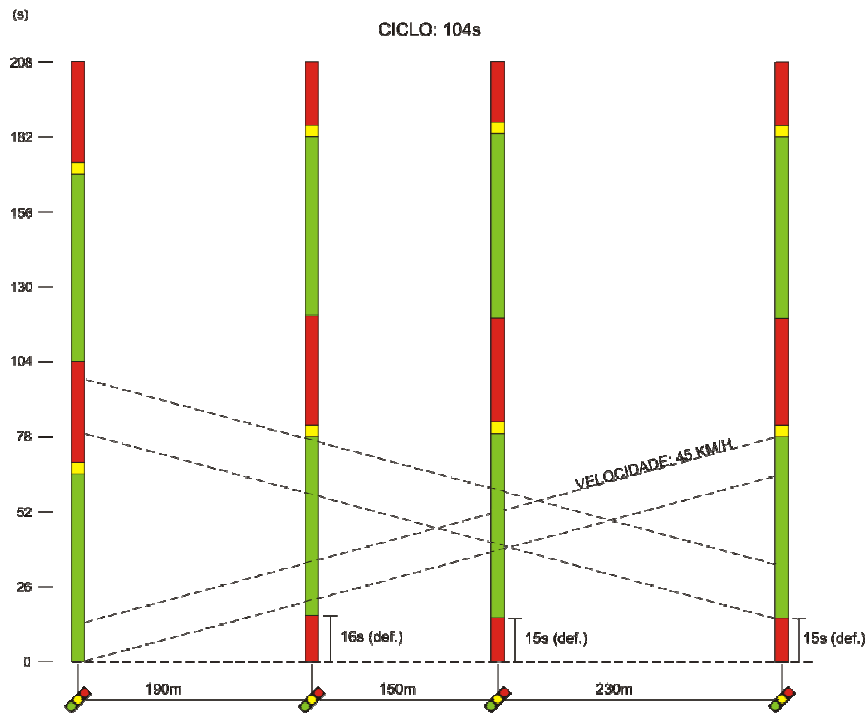
190m 150m 230m

(b) Via de mão dupla

Figura 6.9: Defasagem entre sinalizações semafóricas ao longo de uma via arterial

6.14 Tempo de verde de segurança

Tempos de verde excessivamente curtos não são admissíveis, mesmo que sejam suficientes para atender a respectiva demanda, pois conduzem a situações com alto potencial de acidentes. Para evitá-los, define-se para cada grupo de movimentos, um parâmetro denominado tempo de verde de segurança, que corresponde ao valor mínimo admissível para a duração do tempo de verde que atende a esse grupo.

O dimensionamento da duração desse elemento para veículos é função da hierarquia da via, do volume de veículos, da largura da transversal, da composição do tráfego e da presença de pedestres.

Especificamente com relação à presença de pedestres, o tempo de verde de segurança para os veículos **deve** ter a duração necessária para garantir a travessia dos pedestres, com ou sem grupo focal para pedestres, cujo deslocamento é paralelo ao movimento para o qual está se determinando o verde de segurança veicular.

Os valores utilizados para o tempo de verde de segurança para os veículos variam usualmente entre 10 e 20 segundos, não sendo admitidos valores inferiores a 10 segundos.

O dimensionamento do tempo de verde de segurança para pedestres é função do volume de pedestres e das características específicas de cada travessia. Recomenda-se que a duração

desse verde de segurança seja igual ou superior a 4 (quatro) segundos. Deve-se ressaltar que o tempo de verde de segurança não é dimensionado em função do tempo de duração da travessia. A realização da travessia é assegurada pelo intervalo de vermelho intermitente.

A maior parte dos controladores semafóricos fabricados atualmente permite a programação do tempo de verde de segurança associado a cada grupo de movimentos. Essa programação **deve** refletir os valores calculados para os tempos de verde de segurança na etapa de dimensionamento da sinalização semafórica.

6.14.1 Recálculo da programação

Quando o tempo de verde para certo grupo de movimentos resultar inferior ao correspondente verde de segurança, **deve-se** recalcular a programação a fim de permitir que essa condição passe a ser satisfeita.

Em primeiro lugar, impõe-se que o tempo de verde do grupo de movimentos para o qual ocorreu a insuficiência seja igual ao correspondente tempo de verde de segurança; isso é realizado ajustando o(s) tempo(s) de verde do(s) estágio(s) em que tal grupo de movimentos é liberado. O próximo passo consiste em recalcular o tempo de ciclo para, em seguida, redimensionar os tempos de verde dos estágios.

Apresentam-se, a seguir, os dois métodos mais utilizados para recalcular o tempo de ciclo em função da necessidade de impor, para o estágio j, um tempo de verde real igual ao seu tempo de verde de segurança.

O Método 1 conduz à condição de que todos os grupos de movimentos críticos possuam o mesmo grau de saturação. Entretanto, para garantir tal igualdade, o tempo de ciclo, usualmente, atinge valores muito elevados causando atrasos indesejáveis. Por isso, em geral, se utiliza o Método 2, onde o usuário adota os valores de grau de saturação desejados, exceto para o estágio que teve seu tempo de verde fixado como igual ao tempo de verde de segurança.

No subitem 7.2.4 é apresentado um exemplo numérico de recálculo da programação, para o caso em que o verde calculado é inferior ao verde de segurança, levando em conta os dois métodos.

6.14.2 Método 1

A partir do cálculo do tempo de verde efetivo (Equação 6.13) e do tempo de verde real (Equação 6.14), chega-se à seguinte expressão para a obtenção do tempo de ciclo:

$$t_c = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{y_i}\right) \times \left(t_{v,real} + t_{ent} - t_{pin} - t_{pfn}\right) + T_p$$

Impondo nessa expressão a condição de que o tempo de verde do estágio j é igual ao seu tempo de verde de segurança ($t_{v,seg,j}$), chega-se à Equação 6.16.

$$t_c = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{y_j}\right) \times \left(t_{v,seg,j} + t_{ent,j} - t_{pin,j} - t_{pfn,j}\right) + T_p \qquad (6.16)$$

O cálculo dos tempos de verde é realizado utilizando a Equação 6.13.

6.14.3 Método 2

A Equação 6.9 pode ser escrita na forma:

$$\mathbf{t_c = t_c \times p_1 + t_c \times p_2 + \ldots + t_c \times p_i + \ldots + t_c \times p_n + T_p}$$

Consideremos que o estágio *j* tenha seu tempo de verde real igualado ao seu tempo de verde de segurança ($t_{v,seg,j}$). Aplicando essa condição à Equação 6.14, vem:

$$t_{v,efet,j} = t_{v,seg,j} + t_{ent,j} - t_{pin,j} - t_{pfn,j}$$

Combinando as duas equações anteriores e considerando a Equação 6.12, chega-se à seguinte expressão para a obtenção do tempo de ciclo:

$$t_c = t_c \times p_1 + \cdots + \left(t_{v,seg,j} + t_{ent,j} - t_{pin,j} - t_{pfn,j}\right) + \ldots + t_c \times p_n + T_p \qquad (6.17)$$

A fim de obter as frações de verde p_i utilizadas na Equação 6.17, o usuário **deve** impor o correspondente grau de saturação desejado e recorrer à Equação 6.8.

O cálculo dos tempos de verde é realizado utilizando a Equação 6.12, exceto para o estágio cuja duração do tempo de verde real foi imposta como sendo igual ao tempo de verde de segurança.

6.15 Verde mínimo veicular

Verde mínimo veicular é um elemento da programação de uma sinalização semafórica, operando no tipo de controle atuado. Tem por objetivo garantir a passagem de um número mínimo de veículos durante o período de verde de um estágio. Sua duração **deve** ser igual ou maior do que a do verde de segurança.

6.16 Extensão de verde

Extensão de verde é um elemento da programação do tipo de controle atuado. É o intervalo que se acresce ao tempo de verde veicular quando um veículo é detectado durante o verde mínimo veicular ou durante a extensão de verde anterior.

6.17 Tempo de verde máximo

Verde máximo é um elemento da programação do tipo de controle atuado. Tem por objetivo impedir que o tempo de verde se prolongue além de determinado valor, mesmo se ocorrerem ininterruptas solicitações de extensões de verde.

É utilizado para limitar o tempo de espera máximo dos pedestres ou dos veículos que pertençam a movimentos conflitantes com aquele que está sendo atendido pelo verde corrente.

O dimensionamento da duração do tempo de verde máximo depende das características do tráfego e da via. Sugere-se que esse valor seja 50% maior do que o tempo de verde que seria programado se o controle fosse feito por sinalização semafórica de tempo fixo.

6.18 Medidas de desempenho

É essencial avaliar continuamente o desempenho da operação do tráfego em decorrência da programação semafórica. Esta necessidade é maior quando uma nova programação é implementada, mas continua a ser necessária posteriormente, devido ao caráter dinâmico do trânsito.

Existem várias medidas de desempenho que podem ser empregadas nesta avaliação, dentre as quais as mais utilizadas são fila máxima, velocidade média, número de paradas, atraso, consumo de combustível, emissão de poluentes e custo monetário.

As medidas podem ser determinadas indiretamente por meio de programas de computador, denominados simuladores de trânsito. Algumas dessas medidas podem ser obtidas diretamente por meio de pesquisas em campo usando, por exemplo, os métodos indicados nos Apêndices 2 e 4.

A partir de algumas hipóteses simplificadoras, algumas das medidas de desempenho mais empregadas, como o atraso total e a fila máxima podem ser estimadas por expressões matemáticas (ver itens 6.18.2 e 6.18.3).

É importante ressaltar que é necessário avaliar o desempenho do trânsito tanto para os ocupantes dos veículos como para os pedestres.

6.18.1 Número de paradas

O número de paradas é um dos principais indicadores da qualidade da operação do trânsito podendo ser caracterizado pelo número total de paradas, número médio de paradas por veículo, ou porcentagem de veículos que param devido à sinalização semafórica.

A programação semafórica **deve** visar a minimização do número de paradas que, além de gerar desconforto ao usuário, aumenta o consumo de combustível e a emissão de determinados poluentes.

O número de paradas n_p, no caso de operação não saturada e taxas de fluxo de chegada e partida constantes (ver Figura 6.10) pode ser calculado pela Equação 6.18.

$$n_p = \frac{F \times FS}{FS - F} \times \frac{(t_c - t_{v,efet})}{3600} \qquad (6.18)$$

em que,

n_p – número de veículos, ou ucp, que sofrem parada por ciclo;

F – taxa de fluxo, em veículo por hora ou ucp por hora;

FS – fluxo de saturação, em veículo por hora ou ucp por hora.

6.18.2 Fila máxima

Define-se fila como o número total de veículos aguardando em uma aproximação para transpor um local semaforizado. Veículos aproximando-se devagar do final de uma fila usualmente também são considerados como integrantes da mesma.

O indicador “fila máxima” é um dos mais utilizados devido à facilidade com que pode ser observado diretamente em campo e ao fato de que reflete adequadamente os outros indicadores.

A obtenção em campo do indicador “fila máxima” é feita pela observação, ao longo de vários ciclos, do número máximo de veículos na fila por ciclo. O valor do indicador é calculado como a média das filas máximas observadas.

A Figura 6.10 representa uma situação hipotética em que tanto a taxa de fluxo de chegada dos veículos (segmento AD) como a de saída (segmento BC) são constantes, sem aleatoriedade e sem sobredemanda. A cota f_1 exemplifica a fila em um instante durante o período de vermelho enquanto f_2 corresponde a um instante durante o período de verde. A fila f_{max} representa a fila máxima, que ocorre no instante de abertura do verde.

Na Figura 6.10, “n_p” é o número de veículos que pararam no ciclo, o ponto C corresponde ao instante em que a fila é zerada, e “n_c” é o número total de veículos que chegaram no ciclo.

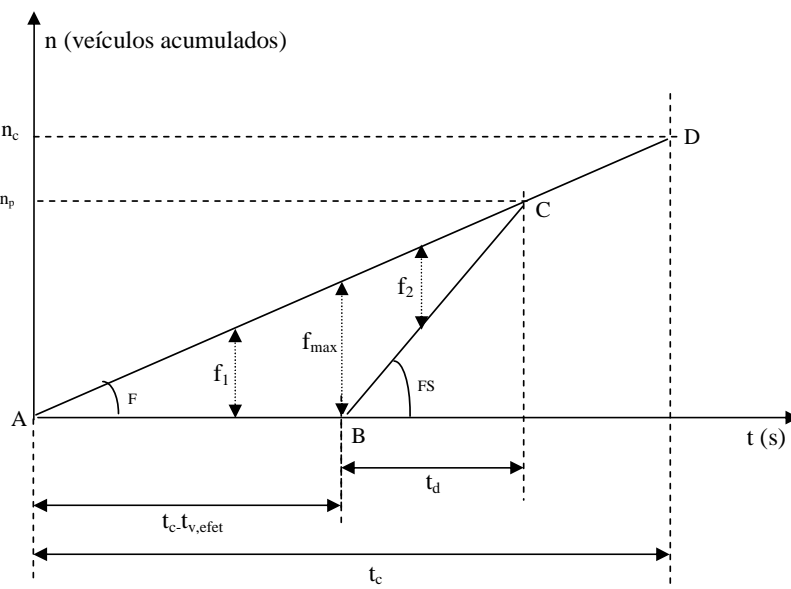



Figura 6.10: Processo de formação e dissipação de fila

A partir da Figura 6.10 pode-se deduzir as expressões da fila máxima e do tempo necessário para sua dissipação (Equações 6.19 e 6.20).

$$f_{max} = F \times \frac{(t_c - t_{v,efet})}{3600} \tag{6.19}$$

e

$$t_d = \frac{F}{FS - F} \times (t_c - t_{v,efet}) \tag{6.20}$$

em que,

f_{max} – fila máxima, em veículo ou ucp;

t_d – tempo necessário para dissipação da fila, em segundos;

F – taxa de fluxo, em veículo por hora ou ucp por hora;

FS – fluxo de saturação, em veículo por hora ou ucp por hora.

Situações onde o tempo necessário para dissipação da fila é superior ao tempo de verde resultam em congestionamento, com o crescimento da fila residual ciclo a ciclo, como pode ser observado na Figura 6.11.

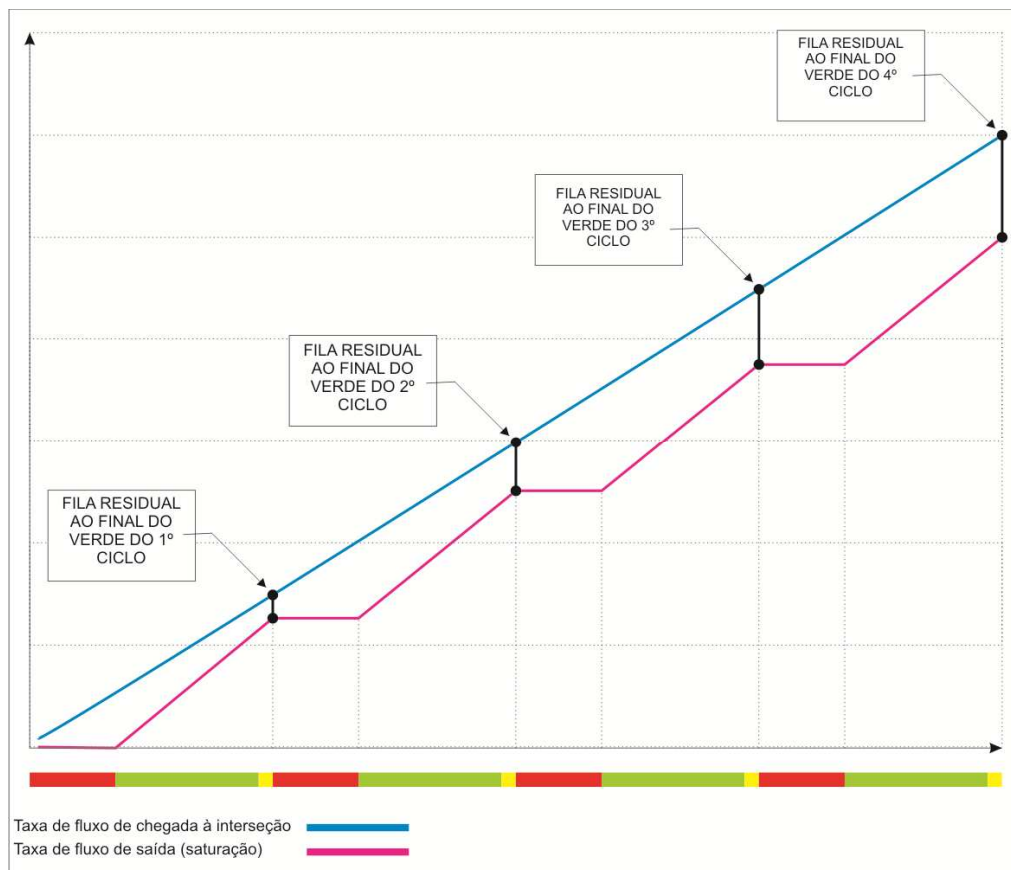



Figura 6.11: Ilustração do crescimento da fila ao longo de mais de um ciclo

6.18.3 Atraso

O indicador “atraso” visa medir a espera causada aos veículos pela sinalização semafórica.

O atraso representa a diferença entre o tempo gasto por um veículo para percorrer um determinado trecho sob o controle semafórico e o tempo que gastaria se percorresse o mesmo trecho em regime de fluxo ininterrupto, na velocidade desejada.

Nas situações de trânsito livre, em que todos os veículos conseguem passar no primeiro período de verde, o atraso é composto pelas parcelas atraso uniforme e atraso aleatório. À medida que o trânsito vai ficando mais saturado, surge também uma terceira parcela que é o atraso por sobredemanda. Quando a operação atinge o congestionamento total, o atraso aleatório desaparece, permanecendo os outros dois.

Na Figura 6.10, a área do triângulo ABC corresponde ao somatório dos atrasos dos veículos durante um ciclo. Como nesse exemplo hipotético a taxa de fluxo de chegada dos veículos é constante, sem aleatoriedade e sobredemanda, este valor é formado somente pelo atraso uniforme.

O valor da área do triângulo, dividido pelo número de veículos durante um ciclo (n_c na Figura 6.10), equivale ao atraso uniforme médio de um veículo e pode ser determinado pela Equação 6.21.

$$a_u = \frac{t_c(1-p)^2}{2(1-px)} \qquad (6.21)$$

em que

a_u – atraso uniforme médio de um veículo, em segundos;

t_c –tempo de ciclo, em segundos;

p – fração de verde (relação entre o tempo de verde efetivo e o tempo de ciclo);

x – grau de saturação.

A expressão da Equação 6.22, elaborada por Webster, pode ser usada para calcular o atraso médio de um veículo, em situações não congestionadas, desde que a chegada dos veículos obedeça a uma distribuição aleatória em torno de um mesmo valor médio, o que significa que a chegada **não deve** ser influenciada por sinalizações semafóricas a montante ou quaisquer outras condições que causem a alteração do valor médio de chegada ao longo do tempo.

Nessa equação, a primeira parcela corresponde ao atraso uniforme, a segunda ao atraso aleatório e a terceira consiste num termo de ajuste da formulação teórica aos resultados práticos registrados.

$$a_{u+al} = \frac{t_c(1-p)^2}{2(1-px)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65\left(\frac{t_c}{q^2}\right)^{1/3} x^{(2+5p)} \qquad (6.22)$$

em que,

a_{u+al} – atraso médio de um veículo, composto pelas parcelas atraso uniforme e atraso aleatório, em segundos;

t_c –tempo de ciclo, em segundos;

p – fração de verde (relação entre o tempo de verde efetivo e o tempo de ciclo);

q – taxa de fluxo expresso em veículo por segundo ou ucp por segundo;

x – grau de saturação

Na maioria dos casos práticos, não se pode considerar que a chegada dos veículos obedeça a um padrão de aleatoriedade em torno de um mesmo valor médio. Interferências a montante, tais como interseções semaforizadas ou não, tornam o padrão de chegada por demais complexo para ser modelado analiticamente com a devida precisão. Além disso, situações sujeitas à sobredemanda, como aquela exemplificada na Figura 6.11, apresentam, evidentemente, dificuldade adicional de modelagem.

Existem algumas expressões analíticas propostas, como por exemplo, as apresentadas no *HCM – Highway Capacity Manual* (TRB, 2000), que procuram tratar os casos práticos. Entretanto, existem vários programas de computador (simuladores da operação do tráfego) que são capazes de oferecer respostas muito mais acuradas do que aquelas obtidas pelas expressões analíticas devido à possibilidade que têm de retratarem mais fielmente as particularidades de cada situação.

7. PROGRAMAÇÃO DE SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA ISOLADA DE TEMPO FIXO

7.1 Etapas de programação

A programação da sinalização semafórica **deve** ser elaborada de acordo com as etapas apresentadas a seguir.

A elaboração da programação semafórica de tempos fixos de uma interseção semaforizada é composta por quatro etapas principais:

Etapa I - Definição das condições em que a programação irá operar. No caso de reprogramação de sinalização semafórica existente, muitas vezes essa etapa não é realizada, pois são adotadas as condições pré-existentes.

Etapa II - Determinação das características operacionais do tráfego.

Etapa III - Cálculo da programação semafórica.

Etapa IV - Implementação da programação e avaliação dos resultados. Esta é uma etapa que **deve** ser cumprida sempre, mesmo que seja através da simples avaliação visual caso não existam recursos para efetivar uma avaliação mais elaborada.

A seguir, apresenta-se o detalhamento de cada uma dessas etapas. Nas Figuras 7.1 a 7.3 são apresentados, respectivamente, os fluxogramas das Etapas I, III e IV.

7.1.1 Etapa I - Definição das condições em que a programação deverá operar

Levantamento das características do local **[a]**

↓

Definição do período de abrangência de cada plano semafórico **[b]**

↓

Definição do tempo de ciclo máximo **[c]**

↓

Estudo dos movimentos **[d]**

↓

Determinação dos grupos de movimentos **[e]**

↓

Definição do diagrama de estágios **[f]**

↓

Determinação dos grupos semafóricos **[g]** | Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos **[h]**

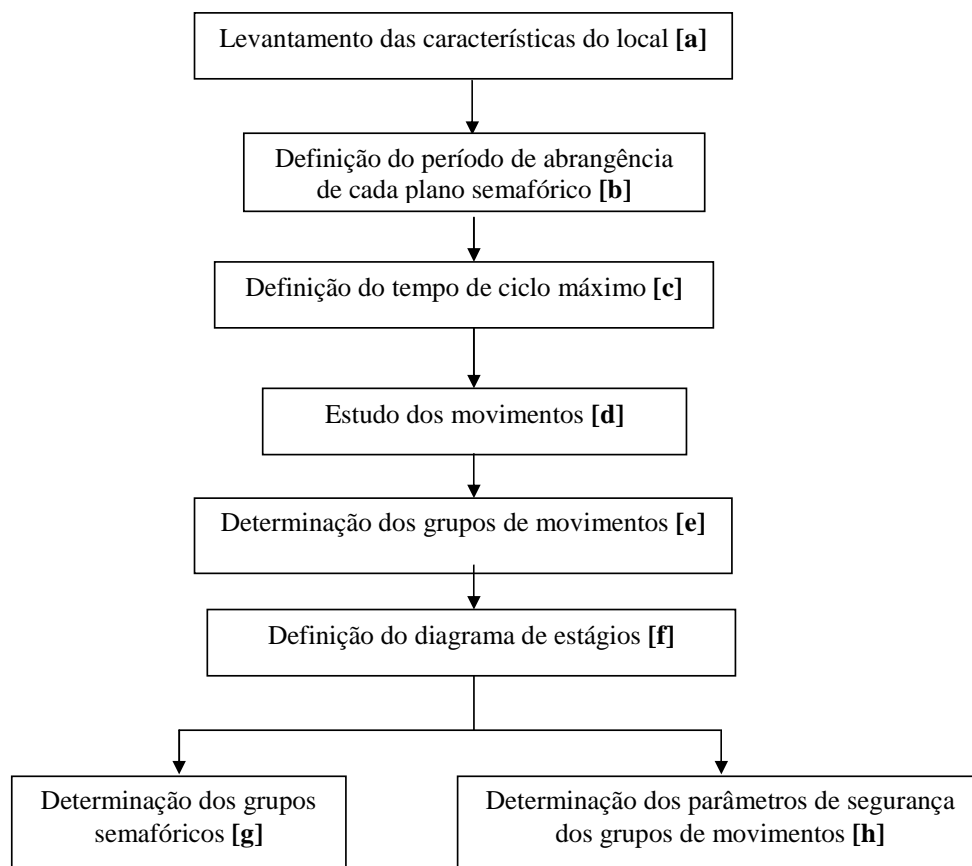



Figura 7.1: Sequência de atividades da Etapa I

Descrição dos blocos do fluxograma:

[a] Levantamento das características do local

O levantamento de campo **deve** contemplar, pelo menos, a observação das seguintes características:

- ✓ geometria e topografia;
- ✓ medição do tempo de percepção e reação dos pedestres;
- ✓ medição da distância de travessia dos pedestres;
- ✓ medição da velocidade dos pedestres;

- ✓ velocidade regulamentada;
- ✓ movimentos permitidos/proibidos;
- ✓ regulamentação de estacionamento;
- ✓ localização de ponto de ônibus;
- ✓ localização de pólos geradores próximos;
- ✓ observação de risco de acidentes no local;
- ✓ histórico de acidentes;
- ✓ histórico de sugestões e solicitações;
- ✓ histórico de intervenções no local;
- ✓ programação semafórica, no caso de sinalização semafórica existente, especialmente quanto a:
    - sequência de estágios;
    - tempo de verde ocioso;
    - tempo de verde insuficiente para veículos e pedestres;
    - análise dos tempos de entreverdes para veículos e pedestres;

[b] Definição do período de abrangência de cada plano semafórico

- ✓ Levantamento dos volumes ao longo do dia (ver Apêndice 3).
- ✓ Definição do período de operação da programação (horários de entrada e saída de cada plano, dias da semana e datas especiais).

[c] Definição do tempo de ciclo máximo

- ✓ Verificar as orientações apresentadas no item 6.9.

[d] Estudo dos movimentos (veículos e pedestres)

- ✓ Movimentos não-conflitantes.
- ✓ Movimentos conflitantes que podem ser atendidos simultaneamente.
- ✓ Movimentos conflitantes que não podem ser atendidos simultaneamente.

[e] Determinação dos grupos de movimentos

- ✓ Determinação dos grupos de movimentos que chegam à sinalização semafórica em cada aproximação.

[f] Definição do diagrama de estágios

- ✓ Definição de quais grupos de movimentos circularão em cada estágio em função dos conflitos entre eles.

- ✓ No caso de haver mais de dois estágios, definição da sua sequência em função, principalmente, de aspectos de segurança.

[g] Determinação dos grupos semafóricos

- ✓ Definição dos grupos semafóricos que atenderão os grupos de movimentos que recebem as mesmas indicações luminosas ao longo do ciclo.

[h] Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos

- ✓ Definição do tempo de verde de segurança para cada grupo de movimentos.

- ✓ Determinação do tempo de entreverdes:

    - amarelo para cada grupo de movimentos veiculares;

    - vermelho intermitente para os movimentos de pedestres;

    - vermelho geral para cada grupo de movimentos.

7.1.2 Etapa II – Determinação das características operacionais do tráfego

- ✓ Determinação do valor do taxa de fluxo de cada grupo de movimentos, a partir das contagens volumétricas, para o período de abrangência do plano considerado.

- ✓ Determinação do valor do fluxo de saturação de cada grupo de movimentos durante o período de abrangência do plano.

- ✓ Determinação dos tempos perdidos inicial e final de cada grupo de movimentos durante o período de abrangência do plano (para sinalização semafórica existente).

7.1.3 Etapa III - Cálculo da programação semafórica

Cálculo das taxas de ocupação **[a]**

Definição dos grupos de movimentos críticos **[b]**

Cálculo do tempo perdido total **[c]**

Cálculo do tempo de ciclo **[d]**

Tempo de ciclo ≤ tempo de ciclo máximo?**[e]**

Sim

Não

Tempo de ciclo = tempo de ciclo Máximo

Cálculo dos tempos de verde efetivo **[f]**

Cálculo dos tempos de verde real **[g]**

Tempos de verde real ≥ tempos de verde de segurança?**[h]**

Sim

Não

Tempo de verde real = tempo de verde de segurança

Cálculo do novo tempo de ciclo **[i]**

∑ Intervalos = tempo de ciclo?**[j]**

Sim

Não

Ajuste dos intervalos

Programação semafórica **[k]**

Figura 7.2: Sequência de atividades da Etapa III

[a] Cálculo das taxas de ocupação

- ✓ Cálculo da taxa de ocupação de cada grupo de movimentos (ver item 6.5)

[b] Definição dos grupos de movimentos críticos

- ✓ Definição do grupo de movimentos crítico representativo de cada estágio ou de um conjunto de estágios para casos mais complexos (ver item 6.6).

[c] Cálculo do tempo perdido total (ver item 6.4)

[d] Cálculo do tempo de ciclo (ver item 6.9)

[e] Tempo de ciclo ≤tempo de ciclo máximo?

Verificação da condição de que o tempo de ciclo **deve** ser igual ou inferior ao tempo de ciclo máximo. Caso isso não ocorra, o tempo de ciclo adotado é igual ao tempo de ciclo máximo.

[f] Cálculo dos tempos de verde efetivo de cada estágio (ver item 6.10)

[g] Cálculo dos tempos de verde real de cada estágio (ver item 6.10)

[h] Tempos de verde real ≥tempos de verde de segurança?

Verificação da condição de que os tempos de verde atribuídos a cada grupo de movimentos, definidos a partir dos tempos de verde de cada estágio, **devem** ser iguais ou superiores aos respectivos tempos de verde de segurança.

Caso isso não ocorra, o tempo do estágio que redundou na insuficiência do verde para algum grupo de movimentos tem que ser aumentado para que o referido grupo passe a dispor de um verde igual ao seu tempo de verde de segurança (ver item 6.14).

[i] Cálculo do novo tempo de ciclo

O tempo de ciclo **deve** ser recalculado, através de métodos específicos (ver item 6.14.1), para atender o(s) novo(s) tempo(s) de verde imposto(s).

[j] ∑ Intervalos = tempo de ciclo?

Verificação da condição de que a soma de todos os intervalos luminosos de um ciclo **deve** ser igual ao tempo de ciclo. Devido à questão dos arredondamentos nos cálculos intermediários, pode ser que tal condição não seja cumprida.

Caso isso não ocorra, o(s) tempo(s) de algum(ns) intervalo(s) **deve(m)** ser ajustados a fim de coincidir sua soma com o tempo de ciclo, garantindo-se a não alteração dos tempos de entreverdes.

[k] Programação semafórica

Os passos anteriores culminaram na programação semafórica pretendida que é, normalmente, apresentada na forma do diagrama de intervalos luminosos.

7.1.4 Etapa IV - Implementação da programação e avaliação dos resultados

Teste do controlador programado **[a]**

Implementação da programação semafórica **[b]**

Acompanhamento na fase inicial **[c]**

Avaliação de desempenho **[d]**

Avaliação de desempenho é satisfatória? **[e]**

Não

Aplicação dos ajustes necessários **[f]**

Sim

Resultado final **[g]**

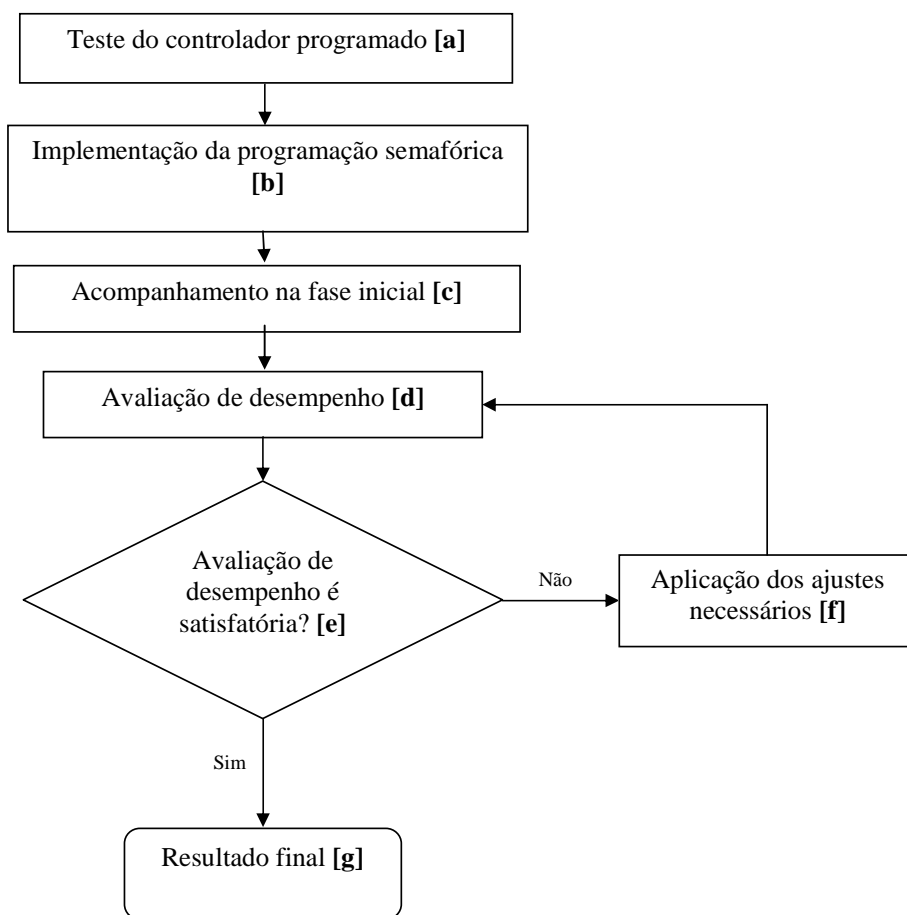



Figura 7.3: Sequência de atividades da Etapa IV

[a] Teste do controlador programado

A programação dimensionada é implementada no controlador responsável pela operação da sinalização semafórica.

O controlador programado **deve** ser testado, de modo a verificar se a programação nele implementada reflete o controle desejado, sobretudo com relação aos parâmetros de segurança.

Este teste contempla, também, o funcionamento de todos os recursos operacionais do equipamento.

[b] Implementação da programação semafórica

Após todos os testes finalizados de modo satisfatório, a programação do controlador é efetivamente implementada em campo.

[c] Acompanhamento na fase inicial

Devem ser realizadas vistorias durante os primeiros dias de operação, iniciadas logo após a implantação do plano no controlador local, para a realização de ajustes, caso necessário.

[d] Avaliação de desempenho

Consiste na avaliação da situação do tráfego depois da implementação da nova programação, com relação à situação anterior. **Devem** ser avaliados aspectos de segurança, tamanho de filas, atraso, número de paradas, grau de saturação, bloqueio de cruzamentos, etc.. Tal avaliação, em função da importância do local e da disponibilidade de recursos, pode ser feita visualmente ou através de pesquisas de campo.

[e] Avaliação de desempenho é satisfatória?

Caso o técnico conclua que os resultados não foram satisfatórios, ele **deve** realizar os ajustes necessários à redução dos problemas detectados.

[f] Aplicação dos ajustes necessários

Deve ser feita a adequação da programação do plano que apresentou desempenho insatisfatório.

[g] Resultado final

O resultado final do trabalho consiste no plano semafórico devidamente testado e ajustado às condições do local.

Todos os levantamentos de campo iniciais, os parâmetros de segurança e tempo de ciclo máximo adotados, a memória de cálculos, a programação semafórica em si, os ajustes finos efetuados e a avaliação de desempenho **devem** ser arquivados para subsidiar futuras reprogramações do local.

7.2 Exemplos de cálculo

A seguir são apresentados exemplos de aplicação numérica dos métodos vistos no Capítulo 6 para cálculo dos tempos semafóricos.

Foi calculado apenas um plano semafórico nos exemplos a seguir (exceto o 7.2.1), como simplificação. Programações multiplanos seguem a mesma metodologia, apenas sendo gerados diferentes planos conforme as faixas horárias em que ocorrem as variações de fluxo (e correspondentes taxas de fluxo) e fluxo de saturação.

7.2.1 Exemplo de cálculo do fluxo de saturação e tempo perdido

Em uma aproximação de uma interseção semaforizada operando em regime de saturação foram aplicadas as técnicas apresentadas no Método 2 do Apêndice 6, obtendo-se o histograma reproduzido na Figura 7.4.

A programação semafórica dessa aproximação, durante a coleta de dados, tinha os seguintes tempos: 66 segundos de verde; 3 segundos de amarelo e 1 segundo de vermelho geral. Esses tempos estão reproduzidos no diagrama de barras abaixo do histograma da Figura 7.4. Com base no apresentado no item 6.4, seguem os cálculos dos tempos perdidos no início e no final do estágio.

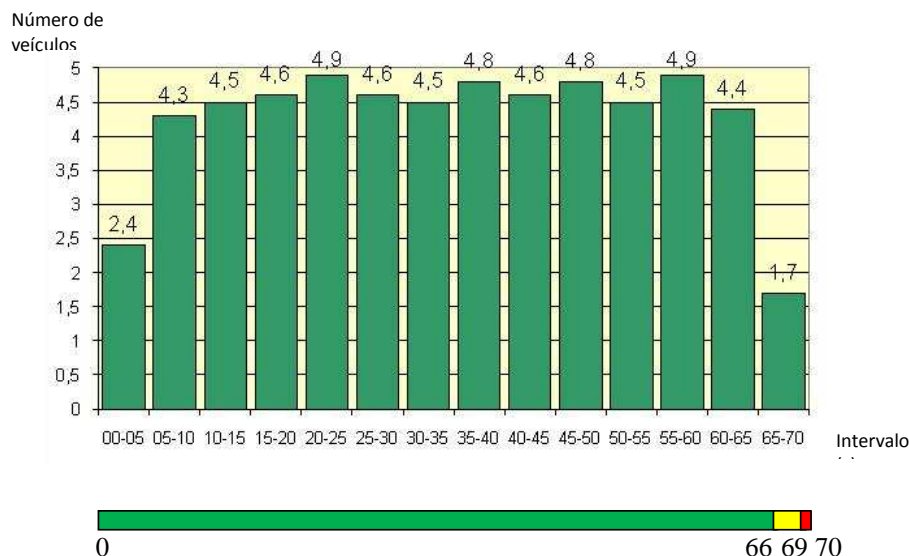



Figura 7.4: Histograma de fluxo

O primeiro passo consiste no cálculo do fluxo de saturação dessa aproximação. Foram registrados 14 intervalos, cada um com 5 segundos de duração. Descartam-se o primeiro e o último, pois eles não representam a condição de fluxo máximo que poderia ser escoado pela via. A média aritmética dos demais intervalos é 4,6 veículos em 5 segundos, o que equivale a 0,92 veíc/s ou 3.312 veíc/h. Esse é o fluxo de saturação: FS = 3.312 veíc/h.

Cálculo do tempo perdido no início do estágio (t_{pin})

No primeiro intervalo, foram observados 2,4 veículos. Seriam necessários 2,4 / 0,92 = 2,6s para escoar esses veículos, se esse intervalo estivesse no regime de saturação. Portanto, o tempo perdido no início foi determinado com o uso da Equação 16 do Apêndice 6.

t_{pin} = 5,0 – 2,6 =2,4s

Cálculo do tempo perdido no final do estágio (t_{pfn})

O intervalo 65-70 é o único em que o aparecimento do entreverdes causa redução do fluxo em relação ao fluxo de saturação. Portanto, utilizando diretamente a Equação 17 do Apêndice 6, vem:

$$t_{pf} = 5 - \frac{1,7}{0,92} = 3,15\,s$$

Portanto, o tempo perdido total (Tp), nesse estágio, é igual a:

$$T_p = t_{pin} + t_{pfn} = 2,40 + 3,15 = 5,55\,s$$

7.2.2 Exemplo do cálculo dos tempos de uma interseção semaforizada

ETAPA I: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa I da programação semafórica, mostrada no item 7.1.

[a] Levantamento das características do local: A interseção considerada é mostrada na Figura 7.5.

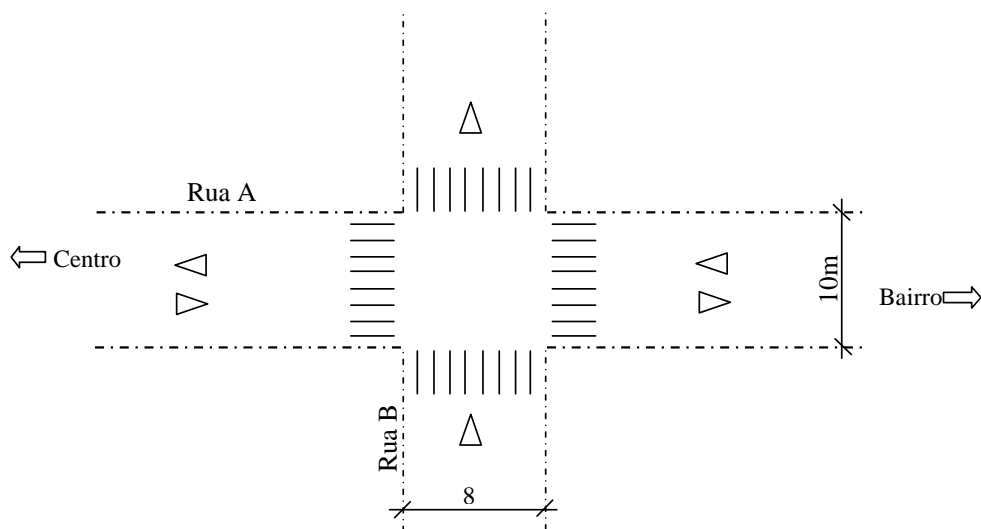



Figura 7.5: Cruzamento da Rua A com a Rua B

[b] Período de abrangência: o plano a ser programado entrará em operação no período das 7h às 9h, dos dias úteis.

[c] Tempo de ciclo máximo: 120s

[d] Estudo dos movimentos: a representação dos movimentos (MV) e das aproximações é apresentada na Figura 7.6, onde:

- Aproximação 1 = Rua A, sentido centro/bairro;

- Aproximação 2 = Rua A, bairro/centro;

- Aproximação 3 = Rua B.

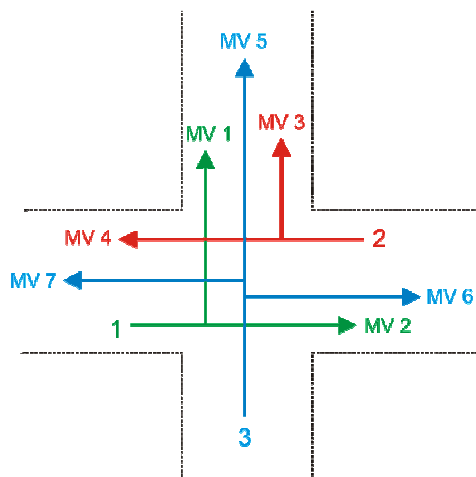



Tabela de movimentos conflitantes

	MV1	**MV2**	**MV3**	**MV4**	**MV5**	**MV6**	**MV7**
MV1			x	x	x		x
MV2					x	x	x
MV3	x				x		
MV4	x				x		x
MV5	x	x	x	x			
MV6		x					
MV7	x	x		x			

Figura 7.6: Representação esquemática dos movimentos e aproximações

[e] Determinação dos grupos de movimentos

Grupo de movimentos 1 (GM1), inclui os movimentos MV1 e MV2;

Grupo de movimentos 2 (GM2), inclui os movimentos MV3 e MV4;

Grupo de movimentos 3 (GM3), inclui os movimentos MV5, MV6 e MV7.

[f] Definição do diagrama de estágios

Considerou-se que, embora conflitantes, os movimentos MV1, MV3 e MV4 podem receber verde simultaneamente, por conta de características peculiares deste exemplo. Neste caso, admitiu-se que os fluxos dos movimentos MV3 e MV4 apresentam brechas em número e duração suficientes para permitir a realização do MV1 e, também, que há boas condições de intervisibilidade. Para situações reais, o técnico **deve** avaliar se as condições operacionais do local permitem esse tipo de arranjo.

Para a situação considerada, portanto, é adotado o diagrama de estágios mostrado na Figura 7.7.

GM2
GM1
Estágio 1
GM3
Estágio 2

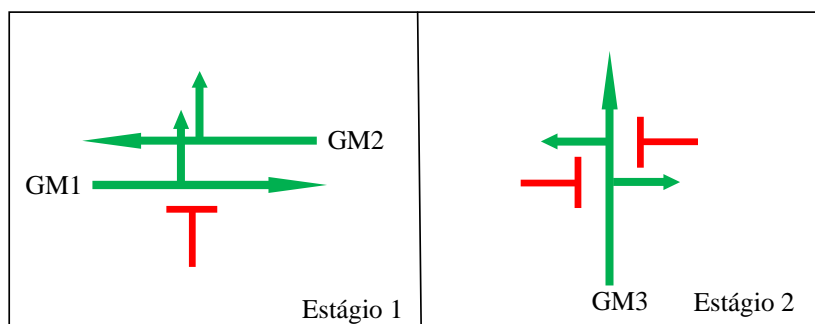



Figura 7.7: Diagrama de estágios

[g] Definição dos grupos semafóricos

A Figura 7.8 mostra a distribuição dos grupos semafóricos G1 e G2, para os três semáforos (grupos focais) que serão utilizados na interseção.

G2
G1
G1

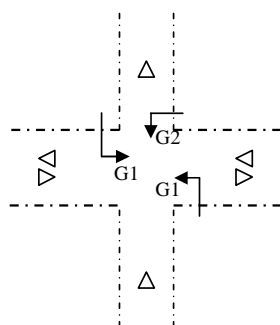



Figura 7.8: Distribuição dos grupos semafóricos

Grupo semafórico 1 (G1) = Rua A, ambos os sentidos, que indica a sinalização para os grupos de movimentos 1 (MV1 e MV2) e 2 (MV3 e MV4);

Grupo semafórico 2 (G2) = Rua B (sentido único), que indica a sinalização para o grupo de movimentos 3 (MV5, MV6 e MV7).

[h] Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos

Tempo de verde de segurança: 12s para todos os grupos de movimentos.

Determinação do tempo de entreverdes

Antes do cálculo, cabe uma discussão sobre os critérios de arredondamento. A maioria dos controladores semafóricos tem resolução de um segundo. Ou seja, não aceitam a inserção de valores decimais para os tempos semafóricos. Sendo assim, os valores calculados **devem** ser arredondados. O critério usual é o do arredondamento para o número inteiro anterior, quando o valor decimal for menor do que 5. Quando o valor decimal for maior ou igual a 5, o arredondamento **deve** ser para o inteiro superior.

Em relação aos entreverdes, uma especial atenção **deve** ser tomada na questão do arredondamento. Normalmente, em casos que envolvem tempos de segurança, como os entreverdes, a tendência é sempre arredondar para o inteiro superior. Portanto, 3,4 segundos seriam arredondados para 4s, por conta da segurança. Como a obtenção do entreverdes prevê a soma de duas parcelas calculadas separadamente, **deve-se** tomar o cuidado de não realizar o arredondamento nas parcelas, sob o risco de elevar excessivamente o valor total. Por exemplo: se no cálculo das duas parcelas foram obtidos os valores 3,6s e 2,1s, o total de entreverdes deveria ser 5,7s e arredondando, ter-se-ia 6s, sendo 4s de amarelo e 2s de vermelho geral. Caso se optasse pelo arredondamento nas parcelas, ter-se-ia 4s e 3s, em um total de 7s de entreverdes. Tal cuidado é importante porque entreverdes excessivos pode ser um fator de risco de acidentes, com os condutores utilizando esse tempo como verde.

Para o cálculo do amarelo foi utilizada a Equação 6.4 (item 6.7.1).

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)}$$

Neste exemplo o tempo de amarelo para todos os grupos de movimento é o mesmo, porque as duas vias têm as mesmas características de velocidade e declividade, quais sejam:

t_{pr} = 1,0s;

v = 40 km/h = 11, 1 m/s (vias coletoras);

a_{ad} = 3,0 m/s^2;

i = 0 (vias planas);

g = 9,8m/s^2.

Portanto,

$$t_{am} = 1{,}0 + \frac{11{,}1}{2(3{,}0 + 0 \times 9{,}8)} = 2{,}9s$$

Para o cálculo do vermelho geral (t_{vg}), foi adotada a Equação 6.5.

$$t_{vg} = \frac{d_2 + c}{v}$$

Então, para os grupos GM1 e GM2, atendidos no Estágio 1:

d_{21} = 6m* + 8m** = 14m

*(distância entre a linha de retenção e o alinhamento da guia da via transversal);

**(largura da Rua B).

Para o grupo GM3, atendido no Estágio 2:

d_{22} = 6m + 10m= 16m

c = 5m (predominância de automóveis no local).

Portanto:

Para o Estágio 1,

$$t_{vg1} = \frac{14 + 5}{11{,}1} = 1{,}7s$$

Para o Estágio 2,

$$t_{vg2} = \frac{16 + 5}{11{,}1} = 1{,}9s$$

Prosseguindo no cálculo dos tempos deste exemplo, o entreverdes será dado pela soma do tempo de amarelo (t_{am}) e do tempo de vermelho geral (t_{vg}). Assim:

$t_{ent,1}$ = 2,9 + 1,7 = 4,6s

$t_{ent,2}$ = 2,9 + 1,9 = 4,8s

Em ambos os casos, será adotado tempo de entreverdes igual a 5s, sendo:

t_{am} = 3s

t_{vg} = 2s

ETAPA II: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa II da programação semafórica, mostrada no item 7.1. Esses dados foram obtidos a partir de levantamentos de campo.

Taxa de fluxo de cada grupo de movimentos

Rua A: F_1 = 700 veíc/h (sentido centro/bairro); F_2 = 600 (bairro/centro);

Rua B: F_3 = 900 veíc/h.

Fluxo de saturação (FS)

Rua A: FS_1 = 1.800 veíc/h (centro/bairro); FS_2 = 1.700 (bairro/centro);

Rua B: FS_3 = 3.000 veíc/h.

Tempo perdido inicial e final de cada grupo de movimentos

Neste exemplo, admitiu-se que não foi feito levantamento em campo dos tempos perdidos e, portanto, considerou-se o tempo perdido de cada grupo de movimentos como sendo igual ao seu tempo de entreverdes.

ETAPA III: A seguir são apresentados os cálculos previstos na Etapa III da programação semafórica, mostrada no item 7.1.

[a] Cálculo das taxas de ocupação: realizado com o uso da Equação 6.2.

$$y = \frac{F}{FS}$$

- taxa de ocupação do grupo de movimentos 1 (y_1):

$$y_1 = \frac{F_1}{FS_1}$$

$$y_1 = \frac{700}{1.800} = 0{,}38$$

- taxa de ocupação do grupo de movimentos 2 (y_2):

$$y_2 = \frac{600}{1.700} = 0{,}35$$

- taxa de ocupação do grupo de movimentos 3 (y_3):

$$y_3 = \frac{900}{3.000} = 0{,}30$$

[b] Definição dos grupos de movimentos críticos

No estágio 1 há dois grupos de movimentos recebendo verde simultaneamente (grupos de movimentos 1 e 2). Como esses dois grupos de movimentos recebem verde durante exatamente o mesmo período, a taxa de ocupação a ser considerada no cálculo **deve** ser a maior entre os dois grupos de movimentos. No caso, será adotada y_1, por ser maior que y_2. O grupo de movimentos 1 será, portanto, o grupo de movimentos crítico do estágio 1.

O somatório das taxas de ocupação para a interseção é igual a:

$\sum y_i = y_1 + y_3 = 0{,}38 + 0{,}30 = 0{,}68$

[c] Cálculo do tempo perdido total (T_p)

O tempo perdido total (Tp) será igual a 10s (soma dos entreverdes dos dois estágios).

[d] Cálculo do tempo de ciclo

A seguir a continuidade dos cálculos inclui a determinação dos tempos de ciclo com aplicação dos métodos do grau de saturação máximo e de Webster.

Cálculo do tempo de ciclo pelo método do grau de saturação máximo

O cálculo a seguir é baseado no item 6.9.1. O primeiro passo consiste em calcular a fração de verde (p_i) para cada estágio, usando a Equação 6.8.

$$p_i = \frac{y_i}{xm_i}$$

Neste exemplo, considera-se que os graus de saturação desejados são:

- para a Rua A: xm_1 = 0,85.

- para a Rua B: xm_2 = 0,90.

Vale lembrar que os valores utilizados como grau de saturação são decisões do técnico, baseadas nas peculiaridades operacionais de cada interseção.

Desse modo,

Para o estágio 1:

$$p_1 = \frac{y_1}{xm_1} = \frac{0{,}38}{0{,}85} = 0{,}45$$

Para o estágio 2:

$$p_2 = \frac{y_3}{xm_2} = \frac{0{,}30}{0{,}90} = 0{,}33$$

O que resulta:

$\sum p_i = 0{,}45 + 0{,}33 = 0{,}78$

Cálculo do tempo de ciclo (t_c), de acordo com a Equação 6.9:

$$t_c = \frac{T_p}{1 - \sum_{i=1}^{m} p_i}$$

Portanto:

$$t_c = \frac{10}{1-0{,}78} = 45{,}5s$$

Será adotado t_c = 46s.

[e] A comparação entre o tempo de ciclo calculado e tempo de ciclo máximo mostra que a condição foi atendida.

[f] Cálculo dos tempos de verde efetivos

O cálculo dos tempos de verde neste método é dado pela Equação 6.12:

$$t_{v,efet,i} = p_i \times t_c$$

Então, tem-se que, para o Estágio 1:

$$t_{v,efet,1} = p_1 \times t_c = 0{,}45\ X\ 46 = 20{,}7s$$

Será adotado 21s, para o Estágio 1.

Cálculo para o Estágio 2:

$$t_{v,efet,2} = p_2 \times t_c = 0{,}33\ X\ 46 = 15{,}2s$$

Será adotado 15s, para o Estágio 2.

[g] Cálculo do tempo de verde real

O tempo de verde real é obtido por meio da Equação 6.14

$$t_{v,real} = t_{v,efet} - t_{ent} + t_{pin} + t_{pfn}$$

Neste caso, como o tempo perdido por estágio foi assumido como igual ao entreverdes correspondente, então, o verde real é igual ao verde efetivo.

[h] A comparação entre os tempos de verde real e os correspondentes verdes de segurança (12s) mostra que a condição foi atendida.

[i] Cálculo do novo tempo de ciclo

Não se aplica a este exemplo, em função do resultado de [h]

[j] Soma dos intervalos = tempo de ciclo?

É importante assegurar que, após os arredondamentos efetuados, a soma dos tempos de verde real com os entreverdes seja igual ao tempo de ciclo calculado. Isto é:

$t_c = T_{v,real,1} + T_{v,real,2} + t_{ent}$ = 21+15+10=46s

[k] Programação semafórica

A Figura 7.9 mostra o diagrama de intervalos luminosos (diagrama de barras) para os tempos calculados.

INSTANTE (s)	0	21	24	26	41	44	46
Rua A (G1)							
Rua B (G2)							
INTERVALOS	1	2	3	4	5	6	
DURAÇÃO (s)	21	3	2	15	3	2	
% CICLO	45,6	a	b	32,6	a	b	
ESTÁGIOS	1			2			

Onde: valor de a = 6,5% e b = 4,4%

Figura 7.9: Diagrama de intervalos luminosos para o tempo de ciclo de 46s

Cálculo do tempo de ciclo pelo Método de Webster

Retorno ao bloco ***[d]*** do fluxograma da **Etapa III**.

O cálculo a seguir é baseado no item 6.9.2. Para determinação do tempo de ciclo, é utilizada a Equação 6.11 e parte dos dados obtidos anteriormente:

$$t_c = \frac{1{,}5\ x\ T_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i}$$

No somatório das taxas de ocupação farão parte as parcelas referentes ao estágio 1 (representado por y_1) e ao estágio 2 (y_3). Então, tem-se:

$$t_c = \frac{1{,}5\ x\ 10 + 5}{1 - (0{,}38 + 0{,}3)} = 62{,}5s$$

Será adotado t_c = 63s.

[e] A comparação entre o tempo de ciclo calculado e tempo de ciclo máximo mostra que a condição foi atendida.

[f] Cálculo dos tempos de verde efetivos

Para esse cálculo, será utilizada a Equação 6.13.

$$t_{v,efet,i} = (t_c - T_p) \times \frac{y_i}{\sum_{i=1}^{n} y_i}$$

Para o Estágio 1, tem-se:

$$t_{v,efet,1} = (63 - 10) \times \frac{0{,}38}{0{,}68} = 29{,}6s$$

Será adotado $t_{v,efet,1}$ = 30s.

Analogamente, para o Estágio 2:

$$t_{v,efet,2} = (63 - 10) \times \frac{0,3}{0,68} = 23,4s$$

Será adotado $t_{v,efet,2}$ = 23s

[g] Cálculo do tempo de verde real

Pela mesma razão citada no caso da determinação do tempo de ciclo pelo método do grau de saturação máximo, os cálculos dos tempos de verde apresentarão o mesmo valor para o verde efetivo e o real.

[h] A comparação entre os tempos de verde real e os correspondentes verdes de segurança (12s) mostra que a condição foi atendida.

[i] Cálculo do novo tempo de ciclo

Não se aplica a este exemplo, em função do resultado de [h]

[j] Soma dos intervalos = tempo de ciclo?

Conforme feito para o caso anterior:

$t_c = T_{v,real,1} + T_{v,real,2} + t_{ent} = 30+23+10=63s$

[k] Programação semafórica

A Figura 7.10 mostra o diagrama de intervalos luminosos (diagrama de barras) para os tempos calculados.

INSTANTE (s)	0	30	33	35	58	61	63
Rua A (G1)							
Rua B (G2)							
INTERVALOS	1	2	3	4	5	6	
DURAÇÃO (s)	30	3	2	23	3	2	
% CICLO	47,6	a	b	36,5	a	b	
ESTÁGIOS	1			2			

Onde: valor de a = 4,75% e b = 3,2%

Figura 7.10: Diagrama de intervalos luminosos para o tempo de ciclo de 63s

Análise complementar

Para comparar os resultados obtidos pelos dois métodos, foram calculados os graus de saturação associados aos tempos resultantes da aplicação do método de Webster:

- cálculo das porcentagens de verde (p_i), usando a Equação 6.12:

$$p_1 = \frac{t_{v,efet,1}}{tc} = \frac{30}{63} = 0{,}47$$

$$p_2 = \frac{t_{v,efet,2}}{tc} = \frac{23}{63} = 0{,}36$$

- cálculo dos graus de saturação (x_i), usando a Equação 6.8:

$$x_1 = \frac{y_1}{p_1} = \frac{0{,}38}{0{,}47} = 0{,}81$$

$$x_2 = \frac{y_2}{p_2} = \frac{0{,}30}{0{,}36} = 0{,}83$$

Vale notar que os tempos de ciclo resultaram em valores diferentes para cada um dos métodos utilizados.

No primeiro cálculo, os graus de saturação impostos de 0,90 e 0,85 resultaram em tempo de ciclo igual a 46s. No segundo cálculo, o tempo de ciclo ótimo calculado pelo método de Webster foi igual a 63s, levando a graus de saturação em torno de 0,82 (a diferença entre x_1 e x_2 deve-se aos arredondamentos efetuados nos valores dos verdes efetivos).

Cabe ao técnico, com base nas avaliações dos graus de saturação obtidos, definir qual o tempo de ciclo a ser adotado para a situação sob estudo, levando em conta as recomendações apresentadas no item 6.9.1.

7.2.3 Exemplo do cálculo dos tempos de uma interseção semaforizada, com conversão à esquerda

ETAPA I: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa I da programação semafórica, mostrada no item 7.1.

[a] Levantamento das características do local: A interseção considerada é mostrada na Figura 7.11. A Avenida C é arterial e plana. A Rua D é coletora e com inclinação de 5%, configurando uma rampa ascendente na aproximação com a Avenida C.

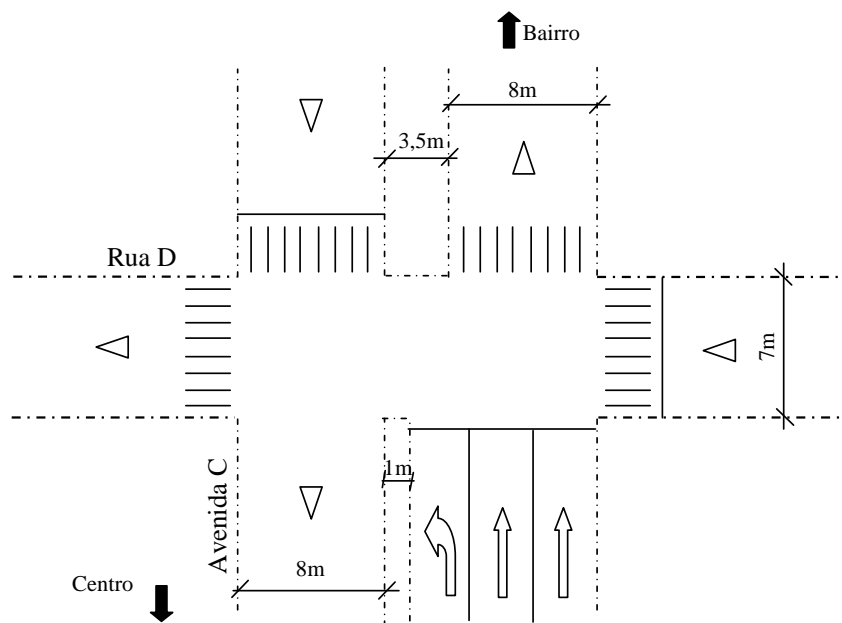



Figura 7.11: Cruzamento da Avenida C com a Rua D

[b] Período de abrangência: o plano a ser programado **deverá** entrar em operação no período das 10h às 12h, dos dias úteis.

[c] Tempo de ciclo máximo: 120s

[d] Estudo dos movimentos: a representação dos movimentos (MV) e das aproximações é apresentada na Figura 7.12, onde:

- Aproximação 1 = Rua C, centro/bairro;

- Aproximação 2 = Rua C, bairro/centro;

- Aproximação 3 = conversão à esquerda;

- Aproximação 4 = Rua D.

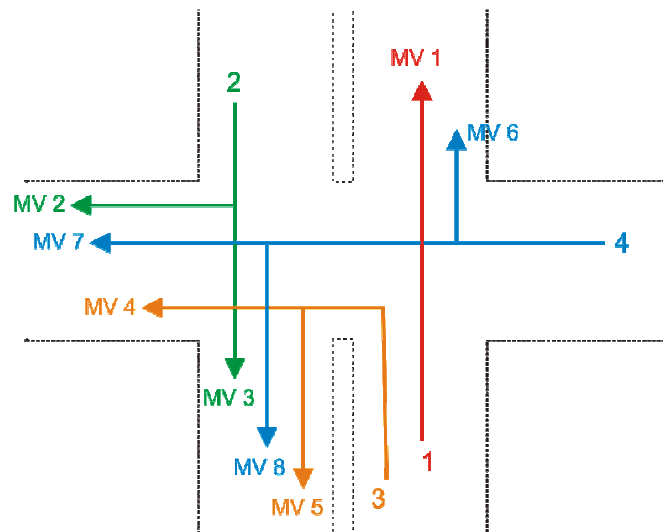



Tabela de movimentos conflitantes

	MV1	**MV2**	**MV3**	**MV4**	**MV5**	**MV6**	**MV7**	**MV8**
MV1						x	x	x
MV2				x	x		x	x
MV3				x	x		x	x
MV4		x	x				x	x
MV5		x	x				x	x
MV6	x							
MV7	x	x	x	x	x			
MV8	x	x	x	x	x			

Figura 7.12: Representação esquemática dos movimentos e aproximações

[e] Determinação dos grupos de movimentos:

Grupo de movimentos 1 (GM1), inclui o movimento MV1;

Grupo de movimentos 2 (GM2), inclui os movimentos MV2 e MV3;

Grupo de movimentos 3 (GM3), inclui os movimentos MV4 e MV5;

Grupo de movimentos 4 (GM4), inclui os movimentos MV6, MV7 e MV8.

[f] Definição do diagrama de estágios:

Para a situação considerada, portanto, é adotado o diagrama de estágios mostrado na Figura 7.13.

GM2
GM1
Estágio 1
GM3
GM1
Estágio 2
GM4
Estágio 3

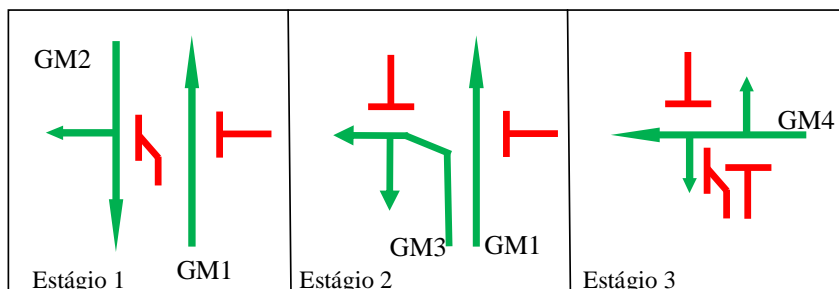



Figura 7.13: Diagrama de estágios

Vale notar que com três estágios é possível estabelecer duas sequências diferentes: 1-2-3, como está no diagrama de estágios mostrado na Figura 7.13, ou 1-3-2.

A escolha de uma ou outra sequência **deve** ser feita pelo técnico, baseada nas condições físicas e de fluxo de cada local, visando promover a segurança e a fluidez do tráfego.

Destaca-se que a utilização de diferentes sequências de estágios em diferentes planos, para um mesmo local, só deve ser empregada em situações especiais, pois essas alterações podem confundir condutores e pedestres que habitualmente passam pelo local.

[g] Definição dos grupos semafóricos

A Figura 7.14 mostra a distribuição dos grupos semafóricos G1, G2, G3 e G4 para os quatro semáforos (grupos focais) que serão utilizados na interseção. Esta distribuição foi feita com base na tabela de movimentos conflitantes.

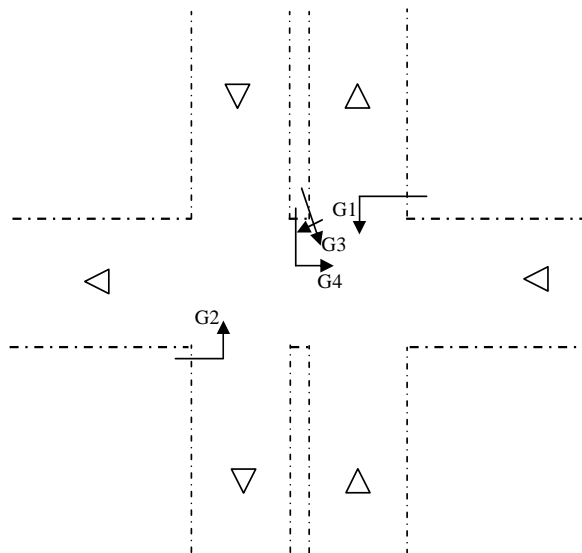



Figura 7.14: Distribuição dos grupos semafóricos

Grupo semafórico 1 (G1) = Avenida C, centro/bairro, que indica a sinalização para o grupo de movimentos 1 (MV1);

Grupo semafórico 2 (G2) = Avenida C, bairro/centro, que indica a sinalização para o grupo de movimentos 2 (MV2 e MV3);

Grupo semafórico 3 (G3) = Avenida C, conversão à esquerda, que indica a sinalização para o grupo de movimentos 3 (MV4 e MV5);

Grupo semafórico 4 (G4) = Rua D, que indica a sinalização para o grupo de movimentos 4 (MV6, MV7 e MV8).

[h] Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos

Tempo de verde de segurança:

Verde de segurança de GM1: 20 s

Verde de segurança de GM2: 20 s

Verde de segurança de GM3: 10 s

Verde de segurança de GM4: 15 s

Determinação do tempo de entreverdes

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)}$$

Tem-se:

t_{pr} = 1s;

$v_{estágios\ 1e\ 2}$= 60 Km/h = 16,6 m/s (via arterial);

$v_{estágio\ 3}$40 km/h = 11, 1 m/s (via coletora);

a_{ad} = 3 m/s^2;

i = 0 para a Avenida C (via plana);

i = 0,05 (declividade de 5%) para a Rua D.

g = 9,8 m/s^2.

Portanto, para os grupos de movimentos GM1, GM2 e GM3, atendidos nos estágios 1e 2os tempos de amarelo são:

$$t_{am,1\ e\ 2} = 1 + \frac{16,6}{2\,(3+0)} = 3,76s$$

Para o grupo de movimentos GM4, atendido no estágio 3, tem-se:

$$t_{am,3} = 1 + \frac{11,1}{2\,(3+0,05\,.\,9,8)} = 2,59s$$

Cálculo do vermelho geral (t_{vg}):

$$t_{vg} = \frac{d_2 + c}{v}$$

Para o Estágio 1: $d_{2,1}$= 6m (faixa de pedestres = 4m + 2m de faixa de retenção e afastamento) + 7m (largura da Rua D) = 13m.

Para o Estágio 2, tem-se duas distâncias, uma percorrida pelos veículos que fazem a conversão ($d_{2,2a}$) e outra pelos que utilizam a Avenida C centro/bairro ($d_{2,2b}$).

Sendo:

$d_{2,2a}$= 2,5m (parte do canteiro central) + 8m (largura da pista bairro/centro da Avenida C) + 4m (faixa de pedestres) = 14,5m.

$d_{2,2b}$= 7m (largura da Rua D) + 4m (faixa de pedestres) = 11m.

Portanto, para o Estágio 2 será usado $d_{2,2a}$, por ter a maior extensão entre os dois.

Para o Estágio 3: $d_{2,3}$= 6m (faixa de pedestres = 4m + 2m de faixa de retenção e afastamento) + 2 x 8m (largura de cada pista da Avenida C) + 3,5m (canteiro central) + 4m (faixa de pedestres) = 29,5m.

c = 5m (predominância de automóveis no local).

Para o Estágio 1:

$$t_{vg,1} = \frac{13+5}{16,6} = 1,08s$$

Para o Estágio 2:

$$t_{vg,2} = \frac{14,5+5}{16,6} = 1,17s$$

Para o Estágio 3:

$$t_{vg,3} = \frac{29,5+5}{11,1} = 3,11s$$

Portanto, os entreverdes serão:

Estágio 1: $t_{ent,\,1} = t_{am,\,1} + t_{vg,\,1} =$ 3,76 + 1,08 = 4,84s. Será adotado 5s, sendo $t_{am,\,1}$= 4s e $t_{vg,\,1}$= 1s

Estágio 2: $t_{ent,2} = t_{am,\,2} + t_{vg,\,2} =$ 3,76 + 1,17 = 4,93s. Será adotado 5s, sendo $t_{am,\,2}$= 4s e $t_{vg,\,2}$= 1s

Estágio 3: $t_{ent,\,3} = t_{am,\,3} + t_{vg,\,3} =$ 2,59 + 3,11 = 5,7s. Será adotado 6s, sendo $t_{am,\,3}$= 3s e $t_{vg,\,3}$= 3s

ETAPA II: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa II da programação semafórica, mostrada no item 7.1. Esses dados foram obtidos a partir de levantamentos de campo.

Taxa de fluxo de cada grupo de movimentos:

Avenida C, centro/bairro, em frente: F_1 = 1.200 veíc/h

Avenida C, bairro/centro: F_2 = 1.150 veíc/h

Avenida C, conversão à esquerda: F_3 = 300 veíc/h

Rua D: F_4 = 400 veíc/h

Fluxos de Saturação (FS)

Avenida C, centro/bairro, em frente: FS_1 = 3.400 veíc/h

Avenida C, bairro/centro: FS_2 = 4.700 veíc/h

Avenida C, conversão à esquerda: FS_3 = 1.300 veíc/h

Rua D: FS_4 = 1.800 veíc/h.

Tempo perdido inicial e final de cada grupo de movimentos

Neste exemplo, admitiu-se que não foi feito levantamento em campo dos tempos perdidos e, portanto, considerou-se o tempo perdido de cada grupo de movimentos como sendo igual ao seu tempo de entreverdes.

ETAPA III: A seguir são apresentados os cálculos previstos na Etapa III da programação semafórica, mostrada no item 7.1.

[a] Cálculo das taxas de ocupação: realizado com o uso da Equação 6.2.

$$y_1 = \frac{F_1}{FS_1} = \frac{1.200}{3.400} = 0{,}35$$

$$y_2 = \frac{F_2}{FS_2} = \frac{1.150}{4.700} = 0{,}24$$

$$y_3 = \frac{F_3}{FS_3} = \frac{300}{1.300} = 0{,}23$$

$$y_4 = \frac{F_4}{FS_4} = \frac{400}{1.800} = 0{,}22$$

[b] Definição dos grupos de movimentos críticos

Na maioria das situações práticas, cada grupo de movimentos recebe verde em apenas um estágio, o que permite identificar facilmente quais são os grupos de movimentos críticos, como aconteceu no exemplo 7.2.2.

Entretanto, há casos em que o mesmo grupo de movimentos é atendido em dois ou mais estágios subsequentes, o que torna mais complexa a identificação dos grupos de movimentos críticos.

Destaca-se que quando um grupo de movimentos é denominado crítico para um estágio, ele **deverá** ser considerado crítico para todos os estágios onde for atendido. Além disso, cada estágio só pode conter um único grupo de movimentos crítico. Estágios exclusivos de pedestres não são considerados neste tipo de análise.

Neste exemplo, o grupo de movimentos 1 (GM1) recebe verde nos estágios 1 e 2. Enquanto isso, GM2 é liberado somente no estágio 1 e GM3 utiliza apenas o estágio 2.

Podem ocorrer duas alternativas:

Alternativa 1 **-** o conjunto GM2/GM3 é mais crítico do que GM1 isoladamente. Neste caso, a programação semafórica **deverá** ser calculada para atender os grupos de movimentos 2, 3 e 4, numa configuração de três estágios: 1, 2 e 3. Enquanto GM2 e GM3 são atendidos, GM1 receberá verde suficiente para atendê-lo já que ele é menos crítico do que o conjunto GM2/GM3. Nesta alternativa, portanto, os grupos de movimentos críticos são: GM2, GM3 e GM4.

Alternativa 2 - GM1 é mais crítico do que o conjunto GM2/GM3. Neste caso, a programação semafórica **deverá** ser calculada para atender aos grupos de movimentos 1 e 4, numa configuração equivalente a apenas dois estágios: “1-2” e 3. Enquanto GM1 é atendido, os grupos de movimentos 2 e 3 poderão ser atendidos perfeitamente, já que o conjunto GM2/GM3 é menos crítico do que GM1. Vale lembrar que o tempo de verde calculado para GM1 em “1-2” **deverá**, ainda, ser repartido em três parcelas: verde para GM2 (estágio 1), entreverdes de GM2 (estágio 1) e verde para GM3 (estágio 2). Nesta alternativa, portanto, os grupos de movimentos críticos são: GM1 e GM4.

A fim de determinar qual alternativa que será utilizada para a programação da sinalização semafórica, **deve-se** calcular o tempo de ciclo para cada uma delas, conforme módulo [d] a seguir. A alternativa que resultar no maior tempo de ciclo será adotada.

[c] Cálculo do tempo perdido total (T_p)

O tempo perdido total (Tp) para cada alternativa, será igual a soma dos entreverdes dos seus estágios.

Alternativa 1: Estágios 1,2 e 3

$T_p = 5 + 5 + 6 = 16s$

Alternativa 2: Estágios "1-2" e 3

$T_p = 5 + 6 = 11s$

[d] Cálculo do tempo de ciclo

Será calculado o tempo de ciclo para cada alternativa, usando o método do grau de saturação máximo. Neste exemplo, considera-se que os graus de saturação desejados são:

GM1: $xm_1 = 0{,}80$

GM2: $xm_2 = 0{,}80$

GM3: $xm_3 = 0{,}80$

GM4: $xm_4 = 0{,}85$

Alternativa 1:

Para o estágio 1:

$$p_1 = \frac{y_2}{xm_2} = \frac{0{,}24}{0{,}80} = 0{,}30$$

Para o estágio 2:

$$p_2 = \frac{y_3}{xm_3} = \frac{0{,}23}{0{,}80} = 0{,}29$$

Para o estágio 3:

$$p_3 = \frac{y_4}{xm_4} = \frac{0{,}22}{0{,}85} = 0{,}26$$

o que totaliza:

$\sum p_i = 0{,}30 + 0{,}29 + 0{,}26 = 0{,}85$

Cálculo do tempo de ciclo (t_c):

$$t_c = \frac{T_p}{1 - \sum_{i=1}^{n} p_i}$$

$$t_c = \frac{16}{1 - 0{,}85} = 107\ s$$

Alternativa 2:

Para o estágio "1-2":

$$p_{1-2} = \frac{y_1}{xm_1} = \frac{0{,}35}{0{,}80} = 0{,}44$$

Para o estágio 3:

$$p_3 = \frac{y_4}{xm_4} = \frac{0{,}22}{0{,}85} = 0{,}26$$

o que totaliza:

$\sum p_i = 0{,}44 + 0{,}26 = 0{,}70$

Cálculo do tempo de ciclo (t_c):

$$t_c = \frac{T_p}{1 - \sum_{i=1}^{n} p_i}$$

$$t_c = \frac{11}{1 - 0{,}70} = 37\ s$$

Conclusão: como o tempo de ciclo da Alternativa 1 é maior do que o da Alternativa 2, a programação será calculada para a primeira alternativa.

[e] A comparação entre o tempo de ciclo calculado e tempo de ciclo máximo mostra que a condição foi atendida.

[f] Cálculo dos tempos de verde efetivos

$$t_{v,efet,i} = p_i \times t_c$$

Então, tem-se para o estágio 1:

$$t_{v,efet,1} = 0{,}30 \times 107 = 32\ s$$

Para o estágio 2:

$$t_{v,efet,2} = 0{,}29 \times 107 = 31\ s$$

Para o estágio 3:

$$t_{v,efet,3} = 0{,}26 \times 107 = 28\ s$$

[g] Cálculo do tempo de verde real

$$t_{v,real} = t_{v,efet} - t_{ent} + t_{pin} + t_{pfn}$$

Neste caso, como o tempo perdido por estágio foi assumido como igual ao entreverdes correspondente, então, o verde real é igual ao verde efetivo.

[h] A comparação entre os tempos de verde real e os correspondentes verdes de segurança mostra que a condição foi atendida.

[i] Cálculo do novo tempo de ciclo

Não se aplica a este exemplo, em função do resultado de [h].

[j] Soma dos intervalos = tempo de ciclo?

É importante assegurar que, após os arredondamentos efetuados, a soma dos tempos de verde efetivo com os entreverdes seja igual ao tempo de ciclo calculado. Isto é:

$t_c = t_{v,\ real,1} + t_{v,\ real,2} + t_{v,\ real,3} + t_{ent} = 32+31+28+16 = 107s$

[k] Programação semafórica

A Figura 7.15 mostra o diagrama de intervalos luminosos (diagrama de barras) para os tempos calculados.

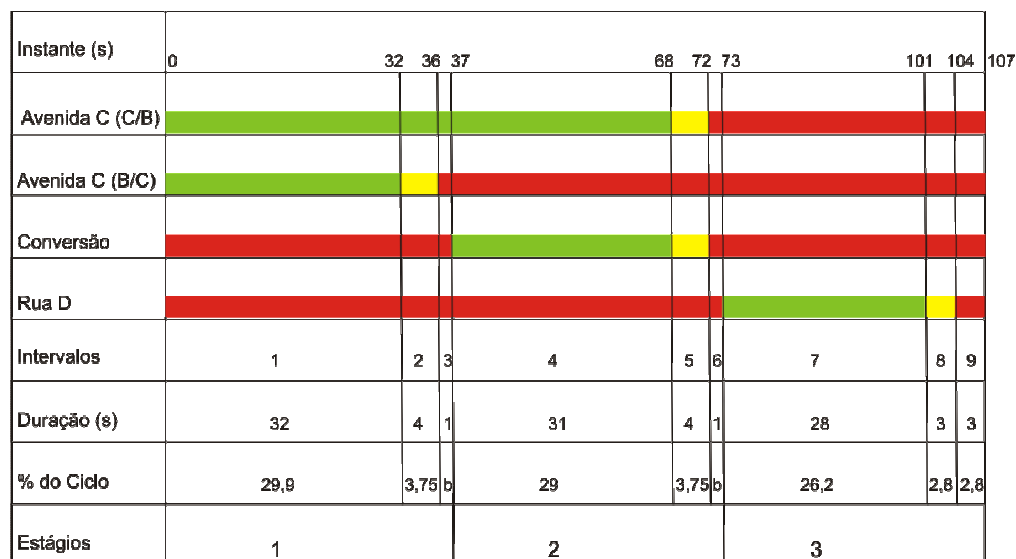
Instante (s)	0	32	36	37	68	72	73	101	104	107
Avenida C (C/B)										
Avenida C (B/C)										
Conversão										
Rua D										
Intervalos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Duração (s)	32	4	1	31	4	1	28	3	3	
% do Ciclo	29,9	3,75	b	29	3,75	b	26,2	2,8	2,8	
Estágios	1			2			3			

Onde: b = 0,9

Figura 7.15: Diagrama de intervalos luminosos para o tempo de ciclo de 107s

Cálculo do tempo de ciclo pelo Método de Webster

Durante o desenvolvimento do cálculo da programação pelo Método do Grau de Saturação concluiu-se que os grupos de movimentos críticos são GM2, GM3 e GM4. Pode-se, então, assumir diretamente essa condição para o presente método.

A aplicação do Método de Webster produziu os resultados a seguir apresentados, que resultaram no diagrama de barras da Figura 7.16:

Tempo de ciclo = 94s

$t_{v,eft,1}$ = 27s

$t_{v,eft,2}$ = 26s

$t_{v,eft,3}$ = 25s

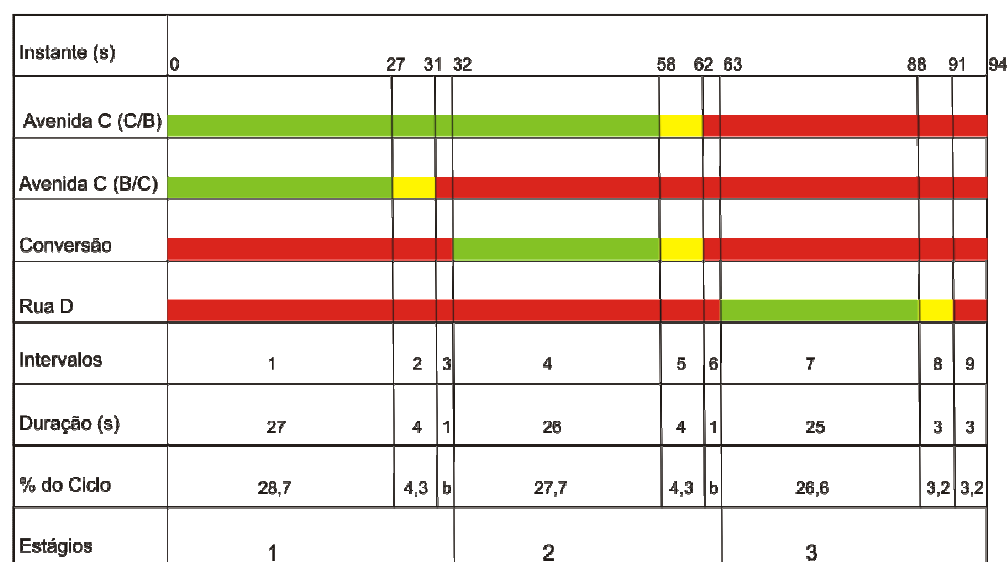
Instante (s)	0	27	31	32	58	62	63	88	91	94
Avenida C (C/B)										
Avenida C (B/C)										
Conversão										
Rua D										
Intervalos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Duração (s)	27	4	1	26	4	1	25	3	3	
% do Ciclo	28,7	4,3	b	27,7	4,3	b	26,6	3,2	3,2	
Estágios	1			2			3			

Onde: b = 1,0

Figura 7.16: Diagrama de intervalos luminosos para o tempo de ciclo de 94s

Análise complementar

Para comparar os resultados obtidos pelos dois métodos, foram calculados os graus de saturação associados aos tempos resultantes da aplicação do método de Webster:

- cálculo das porcentagens de verde (p_i)

$p_1 = t_{v,1} / t_c = 27 / 94 = 0,29$;

$p_2 = t_{v,2} / t_c = 26 / 94 = 0,28$;

$p3 = t_{v,3} / t_c = 25 / 94 = 0,27$.

- cálculo dos graus de saturação (x_i)

$x_1 = y_2 / p_1 = 0,24 / 0, 29 = 0,83;$

$x_2 = y_3 / p_2 = 0,23 / 0,28 = 0,82;$

$x_3 = y_4 / p_3 = 0,22 / 0,27 = 0,81.$

Cabe ao técnico, com base nas avaliações dos graus de saturação obtidos, definir qual o tempo de ciclo a ser adotado para a situação sob estudo, levando em conta as recomendações apresentadas no item 6.9.1.

7.2.4 Exemplo da situação em que o tempo de verde calculado pelo método do grau de saturação é inferior ao respectivo tempo de verde de segurança

ETAPA I: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa I da programação semafórica, mostrada no item 7.1.

[a] Levantamento das características do local: A interseção considerada é mostrada na Figura 7.17.

Rua E

11 m

Rua F

8 m

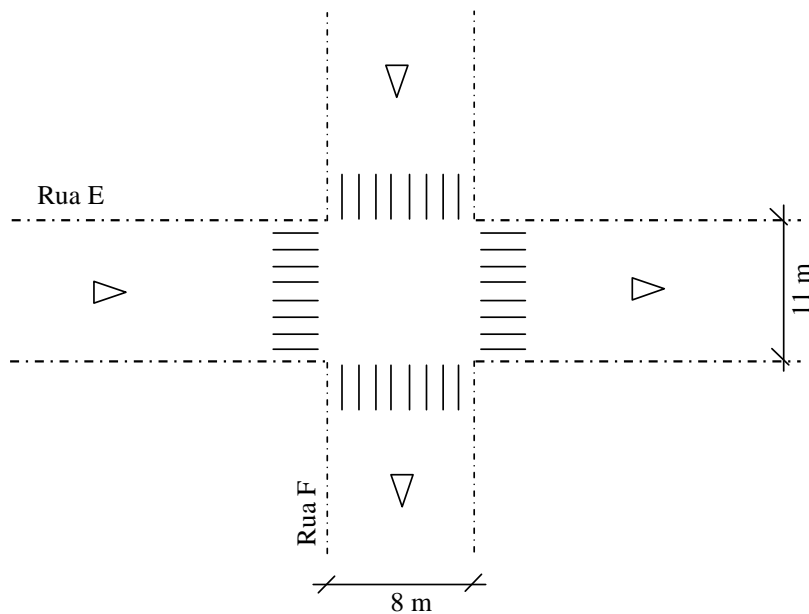



Figura 7.17: Croquis do cruzamento

[b] Período de abrangência: o plano a ser programado irá entrar em operação no período das 12h às 14h, dos dias úteis.

[c] Tempo de ciclo máximo: 100s

[d] Estudo dos movimentos: a representação dos movimentos (MV) e das aproximações é apresentada na Figura 7.18, onde:

- Aproximação 1 = Rua E, sentido único;
- Aproximação 2 = Rua F, sentido único.

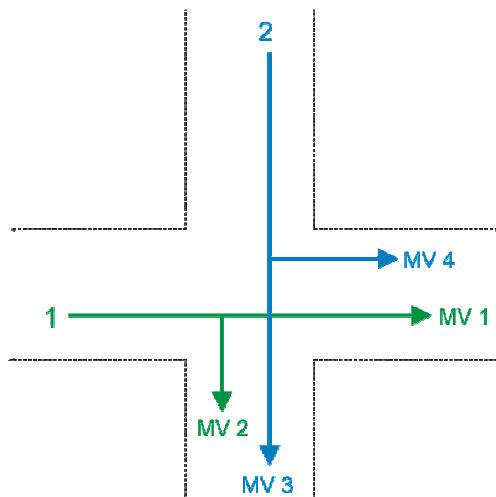



Tabela de movimentos conflitantes

	MV1	**MV2**	**MV3**	**MV4**
MV1			x	x
MV2			x	
MV3	x	x		
MV4	x			

Figura 7.18: Representação esquemática dos movimentos e aproximações

[e] Determinação dos grupos de movimentos:

Grupo de movimentos 1 (GM1), inclui os movimentos MV1 e MV2;

Grupo de movimentos 2 (GM2), inclui os movimentos MV3 e MV4.

[f] Definição do diagrama de estágios

Para a situação considerada, portanto, é adotado o diagrama de estágios mostrado na Figura 7.19.

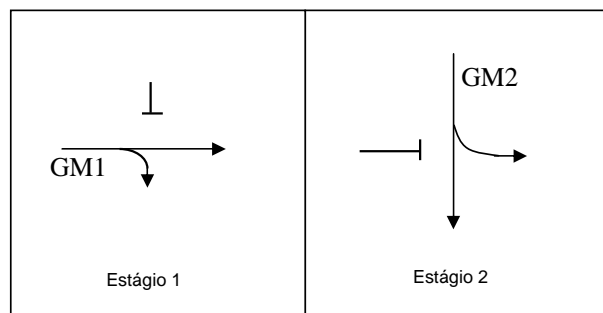



Figura 7.19: Diagrama de estágios

[g] Definição dos grupos semafóricos

A Figura 7.20 mostra a distribuição dos grupos semafóricos G1 e G2, para os dois semáforos (grupos focais) que serão utilizados na interseção.

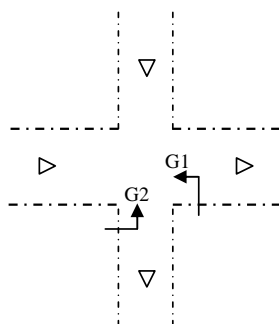



Figura 7.20: Distribuição dos grupos semafóricos

Grupo semafórico 1 (G1) = Rua E (sentido único), que indica a sinalização para o grupo de movimentos 1 (MV1 e MV2);

Grupo semafórico 2 (G2) = Rua F (sentido único), que indica a sinalização para o grupo de movimentos 2 (MV3 e MV4).

[h] Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos

Tempo de verde de segurança:

$t_{v\ seg,1}$ = 16 s;

$t_{v\ seg,2}$ = 12 s.

Determinação do tempo de entreverdes

Neste exemplo, os tempos de amarelo e vermelho geral são fornecidos como dados do problema

$t_{am,\ 1}$ = 4 s; $t_{am,\ 2}$ = 3 s;

Tempos de vermelho geral:

$t_{vg,\ 1}$ = 0; $t_{vg,\ 2}$ = 1 s;

ETAPA II: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa II da programação semafórica, mostrada no item 7.1. Esses dados foram obtidos a partir de levantamentos de campo.

Taxa de fluxo de cada grupo de movimentos:

Rua E: F_1 = 1200veíc/h;

Rua F: F_2 = 360 veíc/h

Fluxo de saturação (FS)

Rua E: FS_1 = 2400veíc/h;

Rua F: FS_2 = 2700 veíc/h

Tempo perdido inicial e final de cada grupo de movimentos

Neste exemplo, considerou-se que os tempos perdidos inicial e final foram medidos em campo e resultaram nos seguintes valores:

$t_{pin,\ 1}$ = 2s; $t_{pfn,\ 1}$ = 2s; $t_{pin,\ 2}$ = 3s; $t_{pfn,\ 2}$ = 1s;

ETAPA III: A seguir são apresentados os cálculos previstos na Etapa III da programação semafórica, mostrada no item 7.1.

[a] Cálculo das taxas de ocupação: realizado com o uso da Equação 6.2.

$$y_1 = \frac{1200}{2400} = 0{,}50$$

$$y_2 = \frac{360}{2700} = 0{,}13$$

O somatório das taxas de ocupação do cruzamento é igual, portanto, a 0,63.

[b] Definição dos grupos de movimentos críticos

Como cada estágio só atende a um grupo de movimentos, os movimentos críticos são:

Estágio 1: GM1

Estágio 2: GM2

[*c*] ***Cálculo do tempo perdido total (T_p):*** é realizado mediante a Equação 6.1.

$$T_p = t_{ep} + \sum_{i=1}^{n} \left(t_{pin,i} + t_{pfn,i} \right)$$

$$T_p = 0 + (2 + 2) + (3 + 1) = 8\ s$$

[d] Cálculo do tempo de ciclo

Neste exemplo, a determinação dos tempos de ciclo é feita pelo método do grau de saturação máximo, adotado como 0,82 para os movimentos críticos dos dois estágios.

$$p_1 = \frac{0{,}50}{0{,}82} = 0{,}61$$

$$p_2 = \frac{0{,}13}{0{,}82} = 0{,}16$$

Como os graus de saturação impostos são os mesmos para os dois estágios, o tempo de ciclo pode ser calculado diretamente por meio da Equação 6.10.

$$t_c = \frac{0{,}82 \times 8}{0{,}82 - 0{,}63} = 35\ s$$

[e] A comparação entre o tempo de ciclo calculado e tempo de ciclo máximo mostra que a condição foi atendida.

[f] Cálculo dos tempos de verde efetivos

$t_{v,efet,1} = 0{,}61 \times 35$ = 21 s

$t_{v,efet,2} = 0{,}16 \times 35$ = 6 s

[g] Cálculo do tempo de verde real

O tempo de verde real é obtido por meio da Equação 6.14.

$$t_{v,real} = t_{v,efet} - t_{ent} + t_{pin} + t_{pfn}$$

$$t_{,real,1} = 21 - (4 + 0) + 2 + 2 = 21\ s$$

$$t_{v,real,2} = 6 - (3 + 1) + 3 + 1 = 6\ s$$

[h] Comparação entre os tempos de verde real e os correspondentes verdes de segurança

Como o tempo de verde real do estágio 2 implicou num tempo de verde para GM2 inferior ao correspondente verde de segurança, igual a 12 segundos, **deve-se** recalcular o tempo de ciclo de forma que o novo verde do estágio 2 seja exatamente igual a esse valor.

[i] Cálculo do novo tempo de ciclo (Método 1 do item 6.14.2.)

Segundo a Equação 6.16:

$$t_c = \left(\frac{0{,}63}{0{,}13}\right) \times (12 + 3 + 1 - 3 - 1) + 8$$

t_c = 66 s

O tempo de verde efetivo do estágio 1 é calculado por:

$$t_{v,efet,1} = (66 - 8) \times \frac{0{,}50}{0{,}63} = 46 \text{ s}$$

E o correspondente tempo de verde real, obtido por meio da Equação 6.14.

$$t_{v,real,1} = 46 - (4 + 0) + 2 + 2 = 46 \; s$$

[j] Soma dos intervalos = tempo de ciclo?

É importante assegurar que, após os arredondamentos efetuados, a soma dos tempos de verde efetivo com os entreverdes seja igual ao tempo de ciclo calculado. Isto é:

$t_c = t_{v,real,1} + t_{v,real,2} + t_{ent}$ = 12 + 46 + 8 = 66s

[k] Programação semafórica

A Figura 7.21 mostra o diagrama de intervalos luminosos para os tempos calculados.

Instante (s)	0	46	50	62	65	66
Rua E						
Rua F						
Intervalos	1	2	3	4	5	
Duração (s)	46	4	12	3	1	
% do Ciclo	69,7	6,1	18,2	4,5	1,5	
Estágios	1		2			

Figura 7.21: Diagrama dos intervalos luminosos para o tempo de ciclo de 66s

É importante observar a forte elevação do tempo de ciclo, de 35 para 66 segundos, causada pela necessidade de atender o verde de segurança e, simultaneamente, manter a condição de que os dois movimentos críticos têm que estar sujeitos ao mesmo grau de saturação. Neste caso, os graus de saturação (Equação 6.7) passam a ser $x_1 = 0,72$ e $x_2 = 0,73$. Tal aumento do tempo de ciclo, de quase 100%, implicará em, aproximadamente, a mesma elevação no atraso do cruzamento.

Por isso, é conveniente considerar alternativas quando se faz necessário refazer o tempo de ciclo devido ao verde de segurança.

Uma possível opção é abrir mão da igualdade dos graus de saturação entre os movimentos críticos. Por exemplo, mantém-se a imposição do grau de saturação original para o grupo de movimentos que não sofreu a restrição do verde de segurança (0,82), o que implica em que a fração de verde original também é mantida. Tal encaminhamento corresponde ao Método 2 apresentado no item 6.14.3 e será aplicado, a seguir, no presente exemplo utilizando a Equação 6.17.

[i] Cálculo do novo tempo de ciclo (Método 2 do item 6.14.3.)

Segundo a Equação 6.17:

$$t_c = t_c \times 0{,}61 + (12 + 3 + 1 - 3 - 1) + 8$$

$t_c = 51$ s

A partir do tempo de ciclo, o tempo de verde real (ver item 6.10) do Estágio 1 é calculado como segue:

O tempo de verde real é obtido por meio da Equação 6.14.

$$t_{v,real} = t_{v,efet} - t_{ent} + t_{pin} + t_{pfn}$$

$$t_{v,real.1} = 0{,}61 \times t_c - (4 + 0) + 2 + 2 = 31\ s$$

$$t_{v,real.2} = 12\ s$$

Neste caso, os graus de saturação (Equação 6.7) serão:

$$x_1 = \frac{1200}{2400 \times 0{,}61} = 0{,}82$$

$$x_2 = \frac{360}{2700 \times \frac{12}{51}} = 0{,}57$$

Observa-se que os dois movimentos críticos apresentam graus de saturação diferentes, ao contrário do Método 1.

[k] Programação semafórica

A Figura 7.22 mostra o diagrama de intervalos luminosos para os tempos calculados.

Instante (s)	0	31	35	47	50 51
Rua E					
Rua F					
Intervalos	1	2	3	4	5
Duração (s)	31	4	12	3	1
% do Ciclo	60,8	7,8	23,5	5,9	2
Estágios	1		2		

Figura 7.22: Diagrama dos intervalos luminosos para o tempo de ciclo de 51s

Análise complementar

Para avaliar o impacto do tempo de ciclo de 66s sobre o desempenho do tráfego na interseção são apresentadas a seguir as medidas de desempenho abordadas no item 6.18.

Número de paradas

Assumindo que os fluxos de chegada e saída são constantes, pode-se utilizar a equação 6.18 para calcular o número de paradas.

$$n_{p,1} = \frac{1200 * 2400}{2400 - 1200} \times \frac{20}{3600}$$

Portanto, $n_{p,1} = 13{,}33 \frac{\text{veículos}}{\text{ciclo}}$ ou 727 veículos/h

$$n_{p,2} = \frac{360 * 2700}{2700 - 360} \times \frac{54}{3600}$$

Portanto, $n_{p,2} = 6{,}23 \frac{\text{veículos}}{\text{ciclo}}$ ou 340 veículos/h

Assim, o número de veículos parados por hora no cruzamento, será igual a 1067 veículos, o que corresponde a 68% do total de 1560 veículos que passam pelo local.

Fila máxima

Assumindo que as taxas de fluxo de chegada e saída apresentam as características descritas no item 6.18.2, pode-se utilizar a Equação 6.19 para estimar as filas máximas.

$f_{max,1} = 1200 \times \frac{20}{3600}$ = 7 veículos

$f_{max,2} = 360 \times \frac{54}{3600}$ = 6 veículos

Atraso

Assumindo que os fluxos de chegada e saída apresentam as características descritas no item 6.18.3, pode-se utilizar a Equação 6.22 para calcular o atraso médio de um veículo para cada um dos grupos de movimento.

Inicialmente, calcula-se os valores das frações de verde e do grau de saturação.

$$p_1 = \frac{46}{66} = 0{,}70$$

$$p_2 = \frac{12}{66} = 0{,}18$$

$$x_1 = \frac{1200}{2400 \times 0{,}70} = 0{,}71$$

$$x_2 = \frac{360}{2700 \times \frac{12}{66}} = 0{,}73$$

Teoricamente, os valores de x_1 e x_2 deveriam ser idênticos. A pequena diferença observada se justifica devido ao arredondamento nos cálculos intermediários.

$$a_{u+al,1} = \frac{t_c(1-p)^2}{2(1-px)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0{,}65\left(\frac{t_c}{q^2}\right)^{1/3} x^{(2+5p)}$$

$$a_{u+al,1} = \frac{66\,(1-0{,}70)^2}{2(1-0{,}70 \times 0{,}71)} + \frac{0{,}71^2}{2 \times \frac{1200}{3600}(1-0{,}71)} - 0{,}65\left(\frac{66}{\left(\frac{1200}{3600}\right)^2}\right)^{1/3} 0{,}71^{(2+5\times 0{,}70)}$$

$$a_{u+al,1} = 5{,}90 + 2{,}61 - 0{,}83 = 7{,}68\ s$$

$$a_{u+al,2} = \frac{66\,(1-0{,}18)^2}{2(1-0{,}18 \times 0{,}73)} + \frac{0{,}73^2}{2 \times \frac{360}{3600}(1-0{,}73)} - 0{,}65\left(\frac{66}{\left(\frac{360}{3600}\right)^2}\right)^{1/3} 0{,}73^{(2+5\times 0{,}18)}$$

$$a_{u+al,2} = 25{,}55 + 9{,}87 - 4{,}89 = 30{,}53\ s$$

O atraso total do cruzamento, A_t, será igual a:

$$\mathbf{A_t = 1200 \times 7{,}68 + 360 \times 30{,}53 = 20207} \left[\frac{veic}{h}\right] \times \mathbf{s} \quad \mathbf{ou}\ \mathbf{5{,}61} \left[\frac{veic}{h}\right] \times \mathbf{h}$$

7.2.5 Cruzamento com estágio de pedestres em que o tempo de ciclo calculado inicialmente supera o tempo de ciclo máximo adotado – solução pelo método do grau de saturação

ETAPA I: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa I da programação semafórica, mostrada no item 7.1.

[a] Levantamento das características do local: A interseção considerada é mostrada na Figura 7.23.

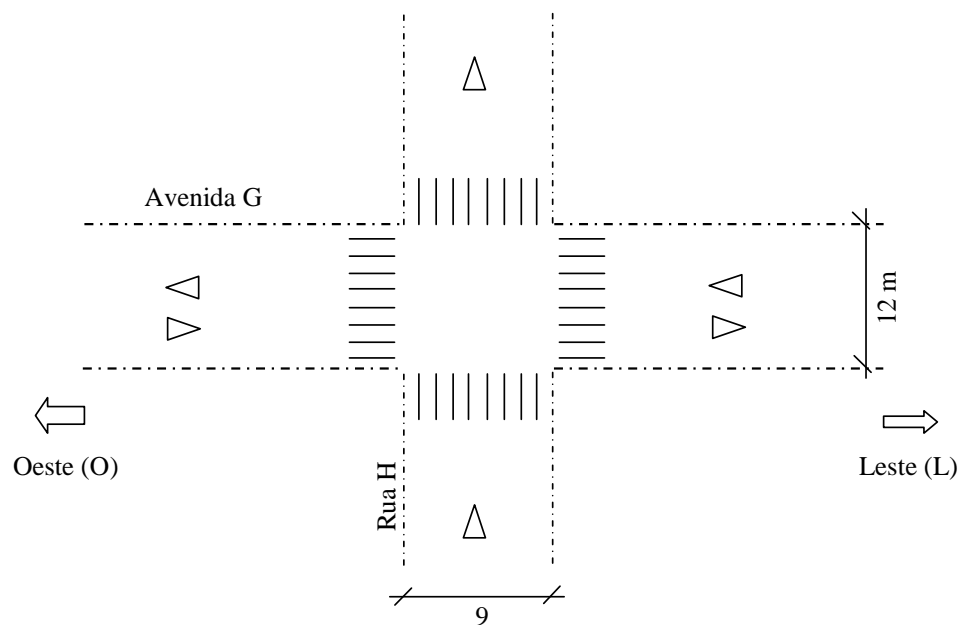



Figura 7.23: Croquis do cruzamento

Observação de risco de acidentes no local

Vistorias ao local indicaram que é necessário prever um estágio exclusivo para os pedestres. Em função dessa necessidade, mediram-se os seguintes parâmetros relativos à travessia de pedestres mais crítica (Ver Apêndice 2), que, neste exemplo, consiste na travessia da Avenida G, do lado Oeste.

$t_{pr,ped}$ = 1 s;

Comprimento da travessia crítica - $l_{travessia}$ = 12 m;

Velocidade do pedestre - v_{ped} = 1,2 m/s;

[b] Período de abrangência: o plano a ser programado entrará em operação no período das 17:30h às 20:00h, dos dias úteis.

[c] Tempo de ciclo máximo: 140s

Neste exemplo adotou-se tempo de ciclo máximo superior ao usualmente recomendado de 120s devido às características do trânsito no local.

[d] Estudo dos movimentos: a representação dos movimentos (MV) e das aproximações é apresentada na Figura 7.24, onde:

- Aproximação 1 = Avenida G, sentido oeste/leste
- Aproximação 2 = Avenida G, sentido leste/oeste
- Aproximação 3 = Rua H, sentido único
- Pedestres = Movimentos MP1, MP2, MP3 e MP4

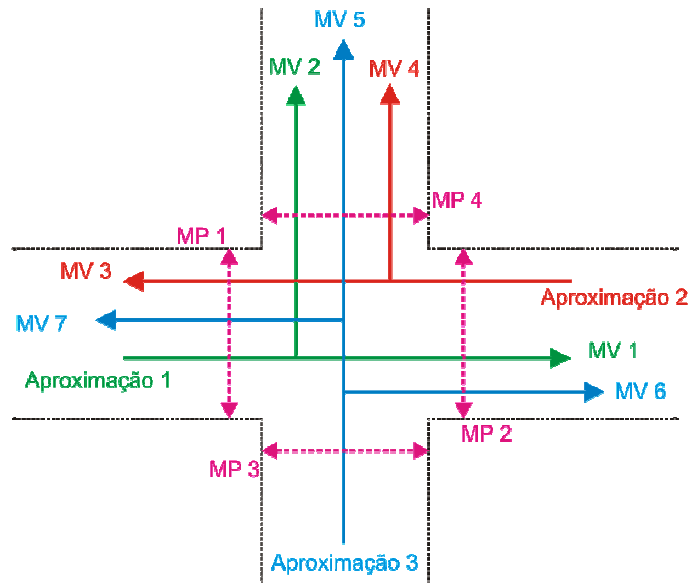



Tabela de movimentos conflitantes

	MV1	MV2	MV3	MV4	MV5	MV6	MV7	MP1	MP2	MP3	MP4
MV1					x	x	x	x	x		
MV2			x	x	x		x	x			x
MV3		x			x		x	x	x		
MV4		x			x				x		x
MV5	x	x	x	x						x	x
MV6	x								x	x	
MV7	x	x	x					x		x	
MP1	x	x	x				x				
MP2	x		x	x		x					
MP3					x	x	x				
MP4		x		x	x						

Figura 7.24: Representação esquemática dos movimentos e aproximações

[e] Determinação dos grupos de movimentos

Grupo de movimentos 1 (GM1), inclui os movimentos MV1 e MV2;

Grupo de movimentos 2 (GM2), inclui os movimentos MV3 e MV4;

Grupo de movimentos 3 (GM3), inclui os movimentos MV5, MV6 e MV7.

[f] Definição do diagrama de estágios

Para a situação considerada, adotou-se o diagrama de estágios mostrado na Figura 7.25.

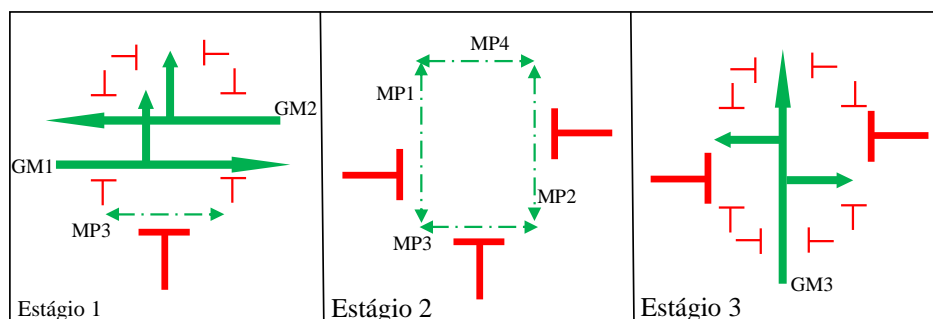



Figura 7.25: Diagrama de estágios

Nas situações em que há estágio exclusivo de pedestres, como é o caso do estágio 2 no exemplo presente, é importante analisar, sob o ponto de vista da segurança viária, em que posição do ciclo que o mesmo deve ocorrer. Para isso, **deve-se** identificar, inicialmente, qual é o movimento de pedestres cuja travessia é mais perigosa. O estágio de pedestres **deverá** ocorrer logo após o estágio em que se forma um volume maior de pedestres que desejam realizar a travessia mais perigosa. Usualmente, quando se trata da interseção de uma avenida com uma transversal de menor classificação viária, é conveniente que o estágio de pedestres ocorra após o estágio veicular que libera a avenida. Entretanto, mesmo nesses casos, podem existir condições particulares que acarretem que a travessia mais perigosa é a da transversal e não a da avenida, levando, portanto, a que o estágio de pedestres ocorra após o estágio veicular que libera a transversal.

[g] Definição dos grupos semafóricos

A Figura 7.26 mostra a distribuição dos grupos semafóricos veiculares G1 e G2 e dos grupos semafóricos de pedestre G3 e G4. que serão utilizados na interseção.

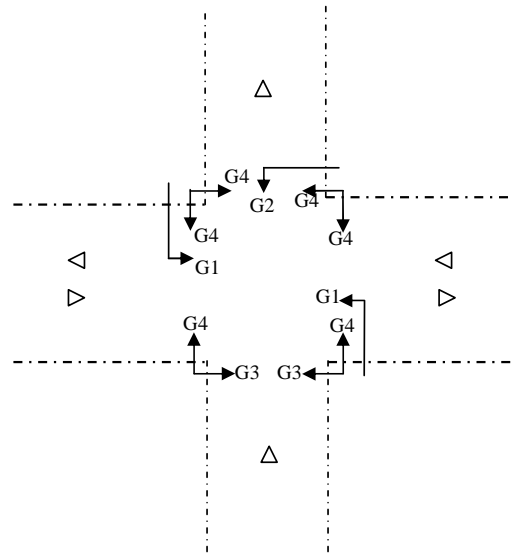



Figura 7.26: Distribuição dos grupos semafóricos

Grupo semafórico 1 (G1) = Avenida G, ambos os sentidos, que indica a sinalização para os grupos de movimentos 1 (MV1 e MV2) e 2 (MV3 e MV4);

Grupo semafórico 2 (G2) = Rua H (sentido único), que indica a sinalização para o grupo de movimentos 3 (MV5, MV6 e MV7).

Grupo semafórico 3 (G3) = Pedestres que indica a sinalização para o movimento MP3.

Grupo semafórico 4 (G4) = Pedestres que indica a sinalização para os movimentos MP1, MP2 e MP4.

[h] Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos

Tempo de verde de segurança: 12s para todos os grupos de movimentos.

Determinação do tempo de entreverdes

Neste exemplo, os tempos de amarelo e vermelho geral são fornecidos como dados do problema. Os tempos de amarelo e vermelho geral dos grupos de movimentos 1 e 2, neste exemplo, são idênticos.

$t_{am,1}$ e $t_{am,2}$ = 4 s; $t_{am,3}$ = 3 s;

$t_{vg,1}$ e $t_{vg,2}$ = 1 s; $t_{vg,3}$ = 2 s;

ETAPA II: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa II da programação semafórica, mostrada no item 7.1. Esses dados foram obtidos a partir de levantamentos de campo.

Taxa de fluxo de cada grupo de movimentos

Avenida G: F_1 = 1770 veíc/h (sentido oeste/leste); F_2 = 1280 veíc/h (sentido leste/oeste);

Rua H: F_3 = 1230 veíc/h.

Fluxo de saturação (FS)

Avenida G: FS_1 = 3400 veíc/h (sentido oeste/leste); FS_2 = 3400 veíc/h (sentido leste/oeste);

Rua H: FS_3 = 4400 veíc/h.

Tempo perdido inicial e final de cada grupo de movimentos

Neste exemplo, considerou-se que os tempos perdidos inicial e final foram medidos em campo e resultaram nos seguintes valores:

$t_{pin,\,1}$ = 2s; $t_{pfn,\,1}$ = 4s; $t_{pin,\,2}$ = 1s; $t_{pfn,\,2}$ = 4s; $t_{pin,\,3}$ = 1s; $t_{pfn,\,3}$ = 3s;

ETAPA III: A seguir são apresentados os cálculos previstos na Etapa III da programação semafórica, mostrada no item 7.1.

[a] Cálculo das taxas de ocupação: realizado com o uso da Equação 6.2.

$$y = \frac{F}{FS}$$

- taxa de ocupação do Grupo de Movimentos 1 (y_1):

$$y_1 = \frac{1770}{3400} = 0{,}52$$

- taxa de ocupação do Grupo de Movimentos 2 (y_2):

$$y_2 = \frac{1280}{3400} = 0{,}38$$

- taxa de ocupação do Grupo de Movimentos 3 (y_3):

$$y_3 = \frac{1230}{4400} = 0{,}28$$

[b] Definição dos grupos de movimentos críticos

No estágio 1 há dois grupos de movimentos recebendo verde simultaneamente (GM1 e GM2). Como esses dois grupos de movimentos recebem verde durante exatamente o mesmo período, a taxa de ocupação a ser considerada no cálculo **deve** ser a maior entre os dois grupos de movimentos. No caso, será adotada y_1, por ser maior que y_2. O GM1 será, portanto, o grupo de movimentos crítico do estágio 1.

A taxa de ocupação do cruzamento é de

$\sum y_i = y_1 + y_3$ = 0,52 + 0,28 = 0,80

[*c*] ***Cálculo do tempo perdido total (T_p):*** é realizado mediante a Equação 6.1.

O estágio 2, que atende a travessia de pedestres, é composto por um tempo de verde cujo valor, neste exemplo, será adotado como 4s e por um tempo de vermelho intermitente, que **deverá** ser suficiente para que o pedestre realize a travessia crítica da Avenida G, sendo calculado pela Equação 6.6:

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{l}{v_p}$$

$$t_{ent} = 1 + \frac{12}{1,2} = 11\ s$$

Após o vermelho intermitente e antecedendo o início do estágio 3, deve ser previsto um intervalo de vermelho geral, conforme consta no item 6.7.2. Neste exemplo, adotou-se o valor de 1,0 s para o vermelho geral.

Portanto, o estágio 2 **deverá** ter duração de 4 + 11+1 = 16 s.

Pode-se calcular, com esses dados, o tempo perdido total T_p através da equação 6.1:

$$T_p = t_{ep} + \sum_{i=1}^{n} \left(t_{pin_i} + t_{pfn_i}\right)$$

$$T_p = 16 + (2 + 4) + (1 + 3) = 26\ s$$

[d] Cálculo do tempo de ciclo

Neste exemplo, a determinação dos tempos de ciclo é feita pelo método do grau de saturação máximo, adotado como 0,85 para os movimentos críticos dos dois estágios.

Como os graus de saturação impostos são os mesmos para os dois estágios, o tempo de ciclo pode ser calculado diretamente por meio da Equação 6.10.

$$t_c = \frac{xm\ T_p}{xm - \sum_{i=1}^{n} y_i}$$

$$t_c = \frac{0,85 \times 26}{0,85 - 0,80} = 442\ s$$

[e] A comparação entre o tempo de ciclo calculado e tempo de ciclo máximo mostra que a condição não foi atendida, pois o valor calculado ultrapassa o tempo de ciclo máximo permitido. **Deve-se** impor, portanto, que o tempo de ciclo seja igual a 140 s.

[f] Cálculo dos tempos de verde efetivos

Como o tempo de ciclo foi alterado em relação àquele indicado pelo Método do Grau de Saturação, é necessário, inicialmente, calcular quais os novos graus de saturação decorrentes

desta alteração. Como foi adotada a condição de que todos os movimentos críticos devem ter o mesmo grau de saturação, pode-se utilizar a Equação 6.10:

$$140 = \frac{x_m \times 26}{x_m - 0{,}80}$$

De onde, determina-se x_m = 0,98.

O próximo passo é calcular a fração de verde (p_i) para cada estágio, usando a Equação 6.8.

Para o estágio 1:

$$p_1 = \frac{0{,}52}{0{,}98} = 0{,}53$$

Para o estágio 3:

$$p_3 = \frac{0{,}28}{0{,}98} = 0{,}29$$

O cálculo dos tempos de verde neste método é dado pela Equação 6.12:

Para o estágio 1:

$$t_{v,efet,1} = 0{,}53\ X\ 140 = 74\ s$$

Para o estágio 3:

$$t_{v,efet,3} = 0{,}29\ X\ 140 = 41s$$

[g] Cálculo do tempo de verde real

O tempo de verde real é obtido por meio da Equação 6.14.

Para o estágio 1:

$$t_{v,real,1} = 74 - 5 + 2 + 4 = 75\ s$$

Para o estágio 3:

$$t_{v,real,3} = 41 - 5 + 1 + 3 = 40\ s$$

[h] A comparação entre os tempos de verde real e os correspondentes verdes de segurança (12s) mostra que a condição foi atendida.

[i] Cálculo do novo tempo de ciclo

Não se aplica a este exemplo, em função do resultado de [h].

[j] Soma dos intervalos = tempo de ciclo?

A soma dos tempos de verde reais e respectivos entreverdes, para todos os estágios **deve** ser igual ao tempo de ciclo.

Verificação:

Soma = (75 + 5) + (4 + 11+1) + (40 + 5) = 141 s

Como a soma superou o tempo de ciclo em 1 segundo, alteramos o tempo de verde real do estágio 2 para 39.

[k] Programação semafórica

A Figura 7.27 mostra o diagrama de intervalos luminosos para os tempos calculados.

Instante (s): 0, 75, 79, 80, 84, 95, 96, 135, 138, 140

Avenida G (G1)									
Rua H (G2)									
Pedestres (G3)									
Pedestres (G4)									
Intervalos	1	2	3	4	5		6	7	8
Duração (s)	75	4	1	4	11	1	39	3	2
% do Ciclo	53,6	2,9	b	2,9	7,9	b	27,8	2,1	c
Estágios	1			2			3		

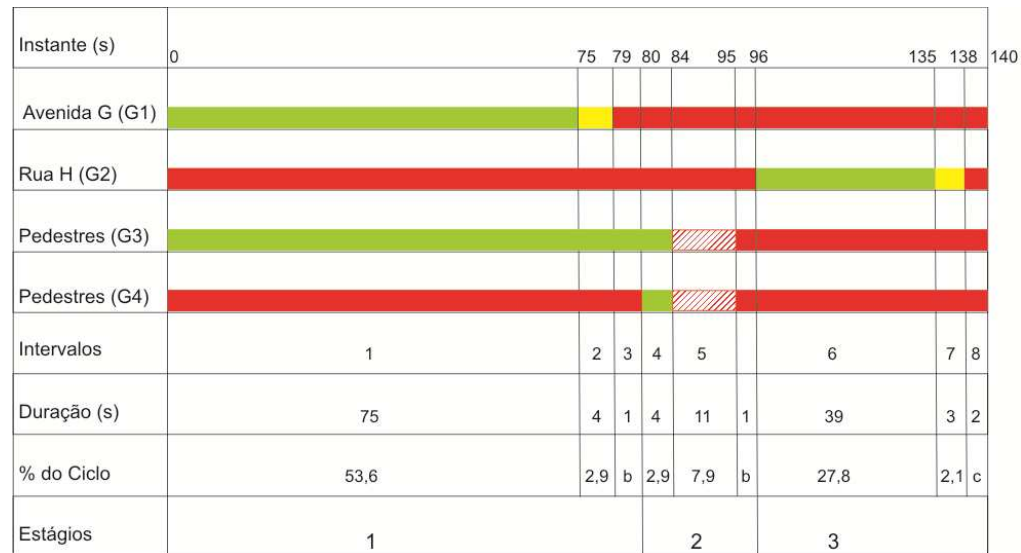



Figura 7.27: Diagrama de intervalos luminosos para o tempo de ciclo de 140s

Onde: b= 0,7; c = 1,4

Análise complementar

A Tabela 7.1 apresenta os indicadores de desempenho que foram calculados a partir das equações 6.18 e 6.22 para as situações com e sem estágio de pedestres. Fixou-se o tempo de ciclo máximo de 140 s para as duas situações.

Tabela 7.1: Indicadores de desempenho

	Atraso (veículos*h/h)	Espera média por veículo (s)	Número de Paradas (veículos/h)
Situação com estágio de pedestres	77,1	65	3928
Situação sem estágio de pedestres	34	29	3444

A Tabela 7.1 permite verificar o aumento do atraso e do número de paradas provocado pela programação do estágio de pedestres. É interessante observar que o tempo de espera médio de um pedestre é igual a 65 s até conseguir atravessar em seu estágio exclusivo.

É importante ressaltar que **devem** ser observados os critérios para a implantação de um estágio de pedestres apresentados no Capítulo 4.

8 . PROGRAMAÇÃO DE SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA ISOLADA ATUADA

8.1 Conceitos básicos

O controle de uma sinalização semafórica é considerado do tipo atuado quando a ocorrência de um ou mais estágios e/ou sua respectiva duração dependem do reconhecimento efetuado por equipamentos detectores de veículos e pedestres que a demandam.

O controle é definido como totalmente atuado quando todos os estágios dependem do reconhecimento da demanda de veículos e/ou pedestres.

O controle é definido como semiatuado quando pelo menos um dos estágios não depende do reconhecimento da demanda dos veículos ou pedestres.

Neste capítulo é considerado apenas o controle atuado baseado no princípio clássico da extensão do tempo verde. Sistemas atuados que trabalham com outras técnicas de programação não são abordados.

Os três parâmetros básicos de um estágio para a programação semafórica do tipo atuado são: verde mínimo, extensão de verde e verde máximo, conforme definições contidas no Capítulo 6.

O verde de um estágio atuado nunca será inferior ao seu verde mínimo mesmo que as demandas cessem antes do seu término.

Cada veículo detectado gera uma solicitação para que o verde seja alongado de um intervalo igual ao valor programado para a extensão de verde do estágio correspondente. Essa solicitação somente é atendida sob determinadas condições que são tratadas ao longo deste capítulo.

A duração do verde não poderá superar o valor programado para o verde máximo, mesmo que continuem ocorrendo novas demandas após o seu término.

A Figura 8.1 exemplifica a sistemática de funcionamento de um estágio atuado em função de solicitações que ocorrem em determinados instantes, de acordo com o princípio clássico da extensão do tempo verde.

$T_{vd\ min}$

S1

S2

S3

S4

extensões de verde (t_{ev})

S5

t_{vd}

t_{vdmax}

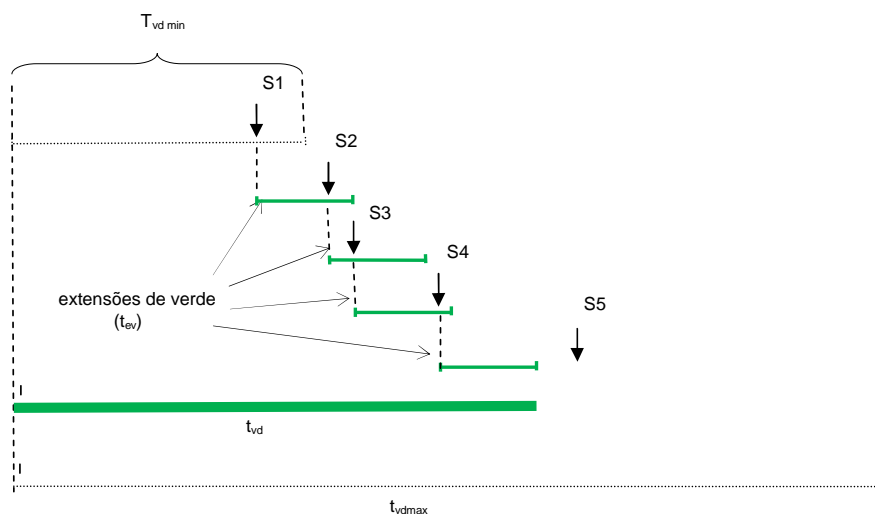



Figura 8.1: Funcionamento de um estágio atuado em função de solicitações de veículos

S_n – solicitação de um veículo;

$t_{vd\ min}$ - tempo de verde mínimo

t_{ev} - tempo de extensão de verde;

$t_{vd\ max}$ - tempo de verde máximo;

t_{vd} - tempo de verde real.

Na Figura 8.1, cada solicitação S_n provoca o prolongamento do intervalo de verde de um tempo igual a t_{ev} (tempo de extensão de verde). Dessa forma, o verde continua enquanto existir uma solicitação que incida dentro da extensão de verde gerada pela solicitação anterior. Como a solicitação S5 ocorreu após o término da extensão provocada pela S4, o intervalo de verde termina no fim dessa extensão, redundando numa duração igual a t_{vd}.

8.2 Projeto de detecção de veículos

Neste item são abordados os elementos a considerar quando da execução do projeto de detecção de veículos. O projeto de detecção de pedestres é apresentado no Capítulo 10. Os diferentes tipos de dispositivos de detecção são apresentados no Capítulo 3.

No projeto de detecção para sinalização semafórica totalmente atuada só **devem** ser mantidos ativos os detectores associados aos movimentos críticos de cada estágio no plano vigente.

8.2.1 Posicionamento longitudinal

O sucesso da atuação depende da leitura correta da demanda, o que recomenda que o local escolhido para a detecção possua características físicas semelhantes às da aproximação semafórica correspondente, por exemplo, mesmo número de faixas.

É preferível posicionar a seção de detecção em um trecho retilíneo, onde o comportamento do trânsito é sempre mais homogêneo. É preferível, também, evitar o posicionamento da seção de detecção em local com estacionamento irregular e/ou eventual.

Convém que o trecho compreendido entre a seção de detecção e a linha de retenção seja livre de interferências tais como pontos de ônibus, acessos de pólos geradores de viagens, etc. Neste trecho não pode existir nenhuma via transversal, para assegurar que os veículos que chegam à linha de retenção sejam os mesmos que foram detectados.

A posição da seção de detecção em relação à linha de retenção é definida em função da estratégia adotada para a determinação do valor do tempo verde.

No caso de estágio atuado dispensável (item 8.5.3), a seção de detecção **deve** ser posicionada próxima da linha de retenção, de modo que a distância entre elas seja inferior ao comprimento de um veículo de passeio.

8.2.2 Configuração da seção detectada

O projeto **deve** prever que não exista possibilidade de que veículos, principalmente motocicletas, passem entre as áreas detectadas por dois detectores vizinhos ou entre um detector e o meio-fio, deixando de ser captados.

Nos casos em que se tem mão-dupla e as correntes de trânsito opostas não estão isoladas por separação física pode ocorrer que um veículo que acabou de passar pela sinalização semafórica acione indevidamente o detector da corrente de trânsito oposta. Uma solução é utilizar o recurso de detectores direcionais, em que o próprio detector se encarrega de registrar apenas os veículos que trafegam na direção e sentido para o qual foi instalado.

No caso do uso de laços detectores indutivos, a fim de coibir a falsa atuação, costuma-se projetar um laço detector, chamado inibidor, posicionado conforme mostrado na Figura 8.2.

A
i
B

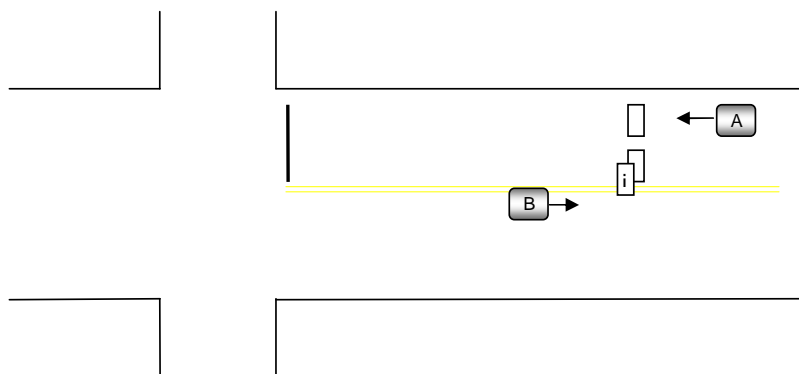



Figura 8.2: Posicionamento de laço detector inibidor

Toda vez que o laço inibidor é acionado pelo veículo B, o sistema desativa por alguns décimos de segundo o laço detector normal que está mais próximo da linha divisória dos fluxos.

8.2.3 Problemas no sistema de detecção

Como o tipo atuado depende totalmente da detecção, qualquer defeito nesta última pode prejudicar o desempenho da sinalização semafórica. Um cuidado essencial é o de parametrizar o controlador para que, no caso de que um detector fique inoperante, o modo atuado seja desativado e a sinalização semafórica passe a operar com tempos fixos, utilizando uma programação especificamente dimensionada para esse fim.

8.3 Parâmetros da programação de estágio atuado por veículos

Os três parâmetros básicos de um estágio para a programação semafórica do tipo atuado por veículo são: verde mínimo, extensão de verde e verde máximo, conforme definições contidas no Capítulo 6.

No caso de estágio atuado por veículo, um parâmetro adicional pode ser utilizado, que é o tempo de retardo.

8.3.1 Verde mínimo

O verde mínimo **deverá** ser igual ao maior dentre os dois valores calculados nas alíneas a e b:

a) O verde mínimo de um estágio **deve** ser igual ou superior aos verdes de segurança dos grupos de movimentos correspondentes.

$$t_{vmín} \geq t_{vseg} \quad (8.1)$$

em que:

$t_{vd\ mín}$ – verde mínimo, em segundos;

$t_{v\ seg}$ – verde de segurança em segundos.

b) O verde mínimo **deve** ser longo o suficiente para assegurar a passagem de todos os veículos que se encontrem entre a linha de retenção e a seção de detecção no princípio do estágio, obtido por meio da Equação 8.2.

$$t_{vmín} = t_{pin} + \frac{d}{esp} * i_{FS} \quad (8.2)$$

em que:

$t_{v\ mín}$ – tempo de verde mínimo, em segundos;

t_{pin} - tempo perdido no início, em segundos;

d – distância entre a linha de retenção e a seção de detecção, em metros;

esp - espaçamento médio entre as frentes dos automóveis em fila, em metros;

i_{FS} - intervalo entre veículos correspondente ao fluxo de saturação, em segundos (i_{FS} = 3600/$FS_{por\ faixa}$).

Em geral, considera-se o tempo perdido no início igual a 3 segundos e o espaçamento médio entre as frentes dos automóveis em fila igual a 6 metros.

8.3.2 Extensão de verde

A determinação da extensão de verde pode visar um dos seguintes propósitos:

i) possibilitar que todo veículo detectado durante o verde de seu estágio consiga passar pela sinalização semafórica ainda nesse mesmo verde, enquanto o verde máximo do estágio não é atingido (estratégia de passagem);

ii) minimizar o atraso total da interseção a partir da identificação do melhor instante de corte do verde (estratégia de corte ótimo).

Na estratégia de passagem, o valor da extensão de verde é determinado pela Equação 8.3.

$$t_{ev} = \frac{d_{det}}{v} \qquad (8.3)$$

em que:

t_{ev} = tempo da extensão de verde, em segundos;

d_{det} = distância entre a seção de detecção e a linha de retenção, em metros;

v = velocidade do fluxo de tráfego na aproximação, em m/s.

Isto é, na estratégia de passagem o valor da extensão de verde depende da localização da seção de detecção.

Na Figura 8.3, o produto da velocidade “v” pela extensão de verde solicitada pelo veículo 1 é igual à distância entre a seção de detecção e a linha de retenção.

Qualquer veículo, com velocidade maior ou igual a “v” que se encontrar no trecho entre os pontos A e B, chegará à seção de detecção antes do fim da extensão de verde provocada pelo veículo anterior e solicitará nova extensão. O veículo 2, por exemplo, será obrigado a parar, pois se encontra a montante do ponto A.

Seção de detecção

2 → v

1 → v

d_{det} d_{det}

A B C

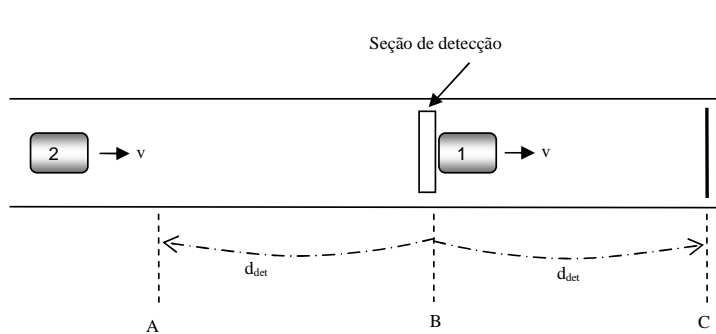



Figura 8.3: Relação entre o posicionamento longitudinal da seção de detecção e a extensão de verde

Na <u>estratégia de corte ótimo</u> considera-se que:

- ✓ os detectores medem o tempo entre o final da passagem de um veículo sobre a seção de detecção e o início da passagem do veículo subsequente sobre a mesma área; este tempo é denominado de “tempo ocioso do detector”;

- ✓ usualmente, o tempo ocioso do detector é identificado para toda a seção de detecção e não para cada faixa isoladamente, ou seja, os veículos detectados podem estar circulando em faixas diferentes.

Para a estratégia de corte ótimo, no caso do estágio atuado controlar mais de uma aproximação, é importante que seja considerada exclusivamente a detecção do movimento crítico para esse estágio durante o período de abrangência de cada plano. Podem ser definidos diferentes movimentos críticos ao longo do dia, associados a diferentes planos.

Na Tabela 8.1, são apresentados valores recomendados para o tempo de extensão de verde (T_{EV}) na estratégia de corte ótimo. Esses valores aplicam-se, em geral, a situações típicas nas quais o fluxo de saturação é igual a 1800 ucp/h por faixa, ou seja, FS = 0,5 ucp/s por faixa, o comprimento da seção detectada é igual a 1,5 metros, o comprimento médio dos veículos é igual a 5 metros e a velocidade de projeto está em torno de 40 km/h.

Tabela 8.1: Exemplos de cálculo de extensão de verde para corte ótimo

NÚMERO DE FAIXAS	FS [(UCP/S) POR APROXIMAÇÃO]	T_{EV}[S]
1	0,5	4,1
2	1,0	1,8
3	1,5	1,0
4	2,0	0,6
5	2,5	0,4

Nas situações muito diferentes das pressupostas para a Tabela 8.1, deverá ser calculado o valor de T_{EV}, considerando: distribuição da chegada dos veículos enquanto a taxa de descarga se mantiver no fluxo de saturação; valor do fluxo de saturação; comprimento da seção detectada no sentido do fluxo, comprimento médio dos veículos e velocidade do fluxo de tráfego na aproximação.

Poderão, também, ser utilizados programas computacionais para esse propósito. A apresentação desses programas está fora do escopo deste Manual.

A programação das extensões de verde **deve** ser implementada em passos de um décimo de segundo a fim de assegurar a sensibilidade e acurácia para ajuste da temporização em função das variações do volume de tráfego.

Na estratégia de corte ótimo, é necessário determinar a extensão de verde antes da definição do posicionamento da seção de detecção. A posição da seção de detecção é definida de forma que o tempo de percurso até a retenção seja igual ao valor desta extensão.

Em algumas situações, entretanto, as condições da via e do tráfego não permitem a localização da seção de detecção exatamente no local definido. Neste caso, ela **deve** ser colocada o mais próximo possível desse local.

Este procedimento evita a existência de verde ocioso e, ao mesmo tempo, permite levar o último veículo do pelotão detectado até a linha de retenção.

8.3.3 Verde máximo

Para o dimensionamento do verde máximo, **deve** ser calculada inicialmente a programação que a sinalização semafórica teria se estivesse operando em tempo fixo, de acordo com o item 7.1.3, que trata do cálculo da programação semafórica para sinalização semafórica isolada de tempo fixo.

a) Verde máximo na estratégia de passagem

O tempo de ciclo de referência no caso da estratégia de passagem é igual ao tempo de ciclo calculado e permite a determinação dos tempos de verde de referência utilizando a Equação 6.14. Isto é, o verde máximo corresponde ao tempo de verde real do estágio considerado na operação em tempo fixo.

No caso dos estágios associados à detecção, o tempo de verde máximo será o próprio valor encontrado para o correspondente verde de referência.

No caso da presença de estágios não associados à detecção, não existe um valor limite máximo para o tempo de verde.

b) Verde máximo na estratégia de corte ótimo

O tempo de ciclo calculado para a programação de tempo fixo **deve** ser majorado para permitir que a sinalização semafórica atuada atenda variações do fluxo de tráfego que ocorrem ao longo do período de abrangência do plano. Propõe-se adotar um valor igual a 1,4 para esse fator de majoração, o que conduz à Equação 8.10:

$$t_c = 1{,}4 * t_{c_{fixo}} \qquad (8.10)$$

em que,

t_c– Tempo de ciclo adotado para o cálculo do verde máximo, em segundos;

t_{cfixo} – tempo de ciclo calculado para operação em tempo fixo, em segundos.

A seguir, utilizando a Equação 6.14, calcula-se para cada estágio o respectivo tempo de verde real, que será adotado como o “verde máximo” do estágio.

Deve-se enfatizar que ao utilizar a Equação 8.10 pode ser que ocorram tempos de ciclos superiores ao tempo de ciclo máximo estabelecido de acordo com as recomendações do item 6.9. Neste caso, o tempo de ciclo adotado **deve** ser igual ao tempo de ciclo máximo.

8.3.4 Tempo de retardo

O tempo de retardo é o tempo transcorrido entre o instante da detecção e o instante em que esta detecção é efetivamente considerada pelo controlador.

Sua função é promover a segurança viária, evitando que, nas situações em que regularmente não haja fila na aproximação controlada pelo estágio atuado, o primeiro veículo atendido adentre a interseção sem ter a oportunidade de verificar se a mesma está totalmente liberada dos movimentos conflitantes (veicular ou de pedestre).

Quando adotado, o tempo de retardo é determinado pela Equação 8.11.

$$\mathbf{t_r = \frac{d_{det}}{v}} \qquad (\mathbf{8.11})$$

em que,

t_r – tempo de retardo, em segundos;

d_{det} = distância entre a seção de detecção e a linha de retenção, em metros;

v = velocidade do fluxo de tráfego na aproximação, em m/s.

8.4 Parâmetros da programação de estágio atuado por pedestres

Os parâmetros básicos de um estágio para a programação semafórica do tipo atuado por pedestres são: tempo do estágio de pedestres e tempo de retardo.

A programação da sinalização semafórica que possui um estágio atuado por pedestres é concluída com a determinação do tempo de ciclo e dos tempos de duração dos estágios veiculares.

8.4.1 Tempo do estágio de pedestres

O estágio de pedestres é formado pelo tempo de verde e pelo tempo de vermelho intermitente. Em alguns casos específicos o vermelho intermitente pode ser seguido de um tempo de vermelho geral.

O tempo de verde é definido de acordo com os critérios estabelecidos no item 6.10, e o tempo de vermelho intermitente é determinado de acordo com a Equação 6.6.

8.4.2 Tempo de ciclo

A determinação do tempo de ciclo **deve** ser realizada de acordo com um dos métodos descritos no Capítulo 6.

8.4.3 Tempos de duração dos estágios veiculares

Nas travessias de pedestres de meio de quadra, o tempo do estágio veicular será simplesmente a diferença entre o tempo de ciclo e o tempo dedicado ao estágio de pedestres.

Em se tratando de uma interseção, as durações dos estágios veiculares serão calculadas conforme procedimento apresentado no Capítulo 6.

8.4.4 Tempo de retardo

O tempo de retardo é o tempo transcorrido entre o instante do acionamento da botoeira e o instante em que a detecção é efetivamente considerada pelo controlador.

O objetivo é que o pedestre tenha tempo para se posicionar junto à faixa de travessia e avaliar o trânsito de veículos que se aproxima a fim de identificar eventual situação insegura antes do início da indicação luminosa verde.

A duração do tempo de retardo depende das características locais, recomendando-se que sejam adotados tempos em torno de cinco segundos.

8.5 Características gerais da programação de sinalização semafórica atuada

Além da definição dos parâmetros referidos nos itens 8.3 e 8.4, a programação de sinalização semafórica atuada inclui a definição de outros elementos que afetam diretamente o controle do tráfego.

8.5.1 Sequência de estágios

É possível programar o controlador de forma que a sequência de estágios não seja sempre a mesma. Neste caso, a ordem em que os estágios ocorrem vai depender da ordem em que aparecem as respectivas demandas.

Geralmente, por questões de segurança, tal flexibilidade não é conveniente, pois pode gerar confusão nos usuários, aumentando a possibilidade de acidentes. A sequência fixa de estágios é mais segura, pois tanto os condutores como os pedestres acostumam-se com esta sequência.

8.5.2 Estágio atuado de duração fixa

É possível configurar determinado estágio atuado para que tenha duração fixa. Para esta situação não cabe a determinação do parâmetro “extensão de verde”.

8.5.3 Estágio dispensável

Estágio dispensável é aquele que não ocorre durante um ciclo caso não tenha sido demandado. Tal recurso pode ser utilizado, por exemplo, nos casos de estágios de pedestres e saídas de terminais de ônibus.

8.5.4 Demanda prioritária

Demanda prioritária é a demanda provocada por veículos cuja circulação seja considerada prioritária sobre a dos demais veículos.

Quando a demanda prioritária é detectada durante a vigência de um estágio que não a atende (estágio concorrente), ela solicita o início imediato do seu estágio.

Neste caso, a detecção do veículo com prioridade **deve** ocorrer a uma distância da linha de retenção que lhe permita chegar na sinalização semafórica durante a indicação verde.

No caso da demanda prioritária ocorrer durante a vigência de um estágio que a atende, o verde corrente é acrescido de uma extensão de verde.

Quando o veículo com prioridade é detectado no início do verde de um estágio concorrente, **deverá** haver tempo suficiente para que o verde de segurança e o entreverdes desse estágio sejam cumpridos, enquanto o veículo prioritário percorre o trecho até a linha de retenção.

A estratégia de prioridade pode ser utilizada, por exemplo, para o atendimento de veículos de emergência e/ou transporte público. Sua utilização **deve** ser precedida de uma completa avaliação do impacto que a mudança inesperada da programação corrente da sinalização semafórica pode trazer à segurança de todos os usuários da via.

8.6 Etapas da programação atuada

A programação da sinalização semafórica isolada atuada segue as mesmas quatro etapas detalhadas no Capítulo 7 para a sinalização semafórica isolada de tempo fixo.

Etapa I - Definição das condições em que a programação deverá operar - que é composta pelas mesmas atividades que compõem essa etapa para a programação de tempos fixos (7.1.1).

Etapa II - Determinação das características operacionais do tráfego - que é composta pelas mesmas atividades que compõem essa etapa para a programação de tempos fixos (7.1.2).

Etapa III - Cálculo da programação semafórica - que é específica para a programação atuada. Os parâmetros e características gerais foram apresentados nos itens 8.3, 8.4 e 8.5, e a sequência das atividades envolvidas no cálculo da programação semafórica para estágio atuado por veículo é apresentada no fluxograma da Figura 8.4 (item 8.6.1). As atividades para a programação de estágio atuado por pedestres são apresentadas no item 8.6.2.

Etapa IV - Implementação da programação e avaliação dos resultados - que é composta pelas mesmas atividades dessa etapa para a programação de tempos fixos (7.1.4).

8.6.1 Atividades da Etapa III para atuação por veículos

Definir estratégia de atuação e sequência de estágios [a]

Para cada estágio efetuar:

Estágio dispensável? Estágio de demanda prioritária? [b]

Determinação do verde máximo [c]

Locação da seção de detecção [d]

Determinação do verde mínimo [e]

Verde máximo > Verde mínimo? [f]

N

S

Verde máximo = Verde mínimo [g]

Estágio tem duração fixa? [h]

S

N

Verde mínimo = Verde máximo [i]

Determinação da extensão de verde [j]

Todos os estágios já foram tratados?

N

S

Programação semafórica **[k]**

Figura 8.4: Fluxograma da Etapa III: atuação por veículos

[a] Definir estratégia de atuação

Definir, com base nas características do local e no objetivo que se pretende alcançar, se os parâmetros da programação do(s) estágio(s) atuado(s) será(ão) determinado(s) segundo a estratégia de passagem ou de corte ótimo (item 8.3.2). Definir se a sequência de estágios será fixa ou flexível (8.5.1).

[b] Estágio dispensável? Estágio de demanda prioritária?

Verificar se o volume de veículos ou pedestres é suficientemente baixo a ponto de justificar que o estágio atuado somente ocorra quando houver a respectiva demanda, ou seja, se o estágio será de caráter dispensável (item 8.5.3).

Verificar se este estágio atende movimentos com veículos de emergência (bombeiros, ambulâncias, etc.) para os quais seja conveniente estabelecer estratégia de prioridade, ou seja, se o estágio será de demanda prioritária (item 8.5.4).

[c] Determinação do verde máximo

Cálculo do tempo de verde máximo a partir da programação que a sinalização semafórica teria se operasse em tempos fixos (item 8.3.3).

[d] Locação da seção de detecção

Determinação da posição em que será instalada a seção de detecção em função da estratégia de atuação adotada e das características geométricas e de trânsito do local (item 8.2.1). No caso da estratégia de corte ótimo, a atividade ***[j]*** tem que preceder a atividade ***[d]***.

[e] Determinação do verde mínimo

Cálculo do tempo de verde mínimo em função dos tempos de verde de segurança e da distância entre a linha de retenção e a seção de detecção (item 8.3.1).

[f] e [g] Verde máximo > Verde mínimo

Comparação entre os valores encontrados para os tempos de verde máximo e verde mínimo. Se o valor calculado para o verde máximo resultar inferior ao do verde mínimo, adota-se o verde máximo igual ao verde mínimo.

[h] e [i] Estágio tem duração fixa?

Se o estágio em questão for de duração fixa, adota-se o verde mínimo igual ao verde máximo. Usualmente, é o caso de estágios de pedestres (item 8.4.1).

[j] Determinação da extensão de verde

A metodologia utilizada no cálculo do tempo de extensão de verde depende se a estratégia é de passagem ou de corte ótimo (item 8.3.2).

[k] Programação semafórica

Uma vez aplicados os passos do fluxograma para todos os estágios, obtém-se a programação da sinalização semafórica analisada Quando necessário, a programação semafórica pode incluir o cálculo do tempo de retardo (8.3.4).

8.6.2 Atividades da Etapa III para atuação por pedestres

O cálculo da programação semafórica para estágio atuado por pedestres consiste na realização das atividades a seguir indicadas.

***[a]* Determinação do tempo de verde**

O tempo de verde do estágio para pedestres é determinado em função das características do local e do fluxo de pedestres, de acordo com o item 6.10.

***[b]* Cálculo do tempo de vermelho intermitente**

O tempo de vermelho intermitente é calculado de acordo com a Equação 6.6 (item 6.7.2).

***[c]* Cálculo do tempo de ciclo**

O tempo de ciclo é determinado conforme critérios estabelecidos no item 6.9..

***[d]* Cálculo dos tempos dos estágios veiculares**

A duração dos estágios veiculares é determinada com base nos critérios definidos no item 6.10.

***[e]* Definição do tempo de retardo**

O tempo de retardo é definido de acordo com as recomendações apresentadas no item 8.4.4.

8.7 Exemplos de programação de sinalização semafórica atuada

8.7.1 Sinalização semafórica totalmente atuada

Apresenta-se a seguir um exemplo de programação semafórica para o controle da interseção mostrada na Figura 8.5 com o uso de sinalização semafórica totalmente atuada.

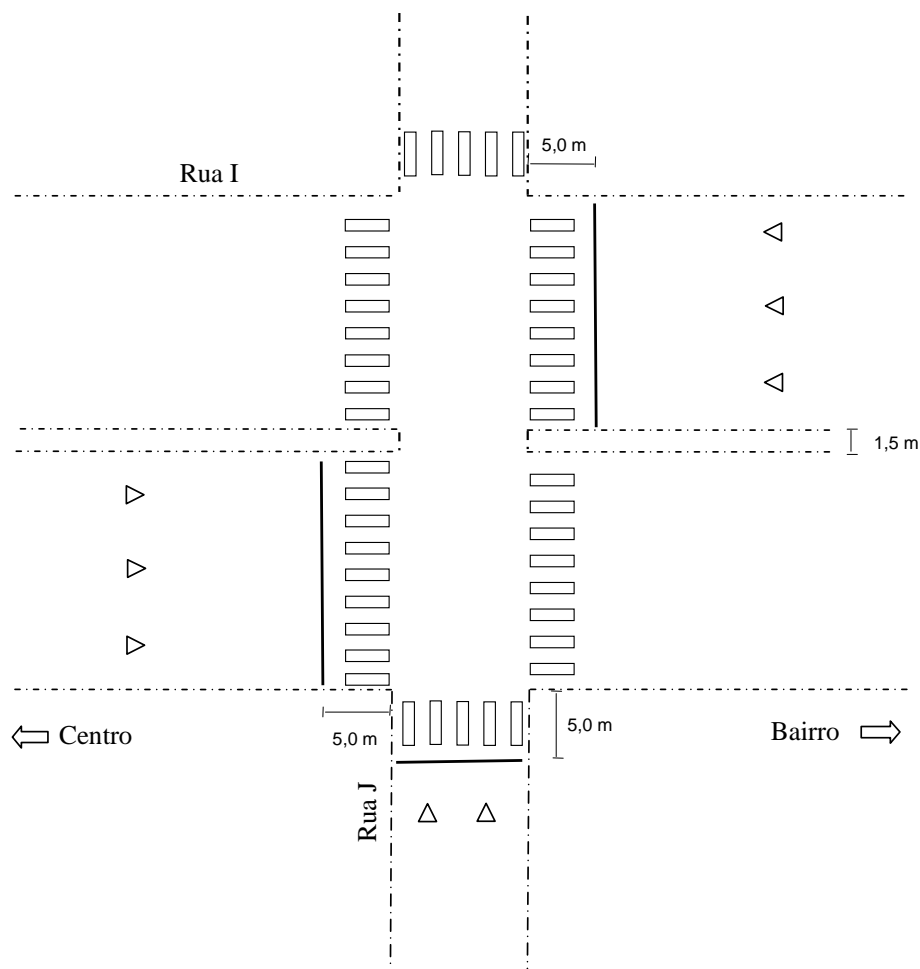



Figura 8.5: Interseção das ruas I e J

ETAPA I: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa I da programação semafórica, detalhada no item 7.1.1.

[a] Levantamento das características do local: A interseção considerada é mostrada na Figura 8.5. A Rua I apresenta três faixas de trânsito em cada sentido e a Rua J possui duas faixas. As faixas de trânsito nas duas vias têm largura igual a 3,2 metros, e a largura do canteiro central é igual a 1,5 metros.

No levantamento, observou-se que preponderam veículos com comprimento igual a 4 metros, com espaçamento médio entre as frentes dos veículos em fila (*esp*) igual a 6,0 metros.

A velocidade regulamentada da Rua I é de 60 km/h (16,7m/s) e da Rua J é de 40 km/h (11,1m/s).

[b] Período de abrangência: o plano a ser programado entrará em operação no período das 6:30 h às 9:45 h, dos dias úteis.

[c] Tempo de ciclo máximo: deseja-se que o tempo de ciclo não ultrapasse o valor de 140 segundos. Como este plano vigorará no horário de pico, é provável que os verdes máximos sejam alcançados.

[d] e [e] Estudo dos movimentos e Determinação dos grupos de movimentos:

A análise das características de trânsito do local conduziu à seguinte distribuição:

Grupo de movimentos 1 (GM1): conjunto de movimentos que se aproximam da interseção pela aproximação da Rua I, sentido centro/bairro;

Grupo de movimentos 2 (GM2): conjunto de movimentos que se aproximam da interseção pela aproximação da Rua I, sentido bairro/centro;

Grupo de movimentos 3 (GM3): conjunto de movimentos que se aproximam da interseção pela aproximação da Rua J;

[f] Definição do diagrama de estágios: foi adotada a configuração apresentada na Figura 8.6.

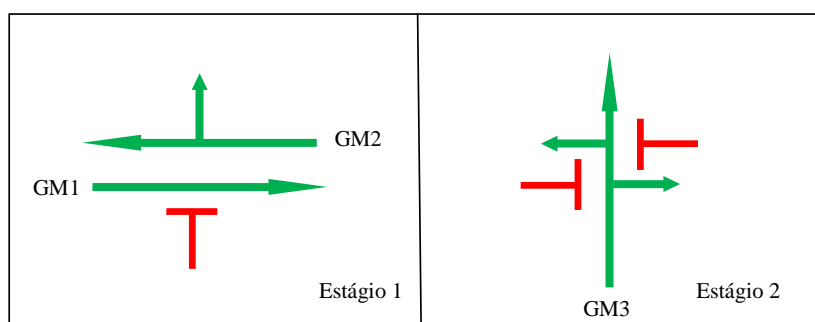



Figura 8.6: Diagrama de estágios

[g] Definição dos grupos semafóricos: a Figura 8.7 mostra a distribuição dos grupos semafóricos G1 e G2 entre os grupos de movimentos.

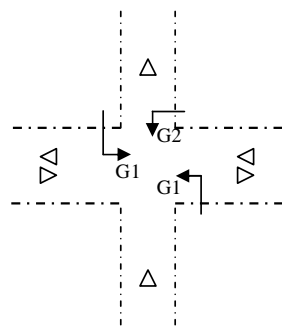



Figura 8.7: Distribuição dos grupos semafóricos

Grupo semafórico G1: Rua I, ambos os sentidos, para os grupos de movimentos 1 e 2.

Grupo semafórico G2: Rua J para o Grupo de Movimentos 3.

[h] Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos:

Tempos de verde de segurança – definidos em função das características do local, de acordo com a orientação do item 6.14:

Verde de segurança de GM1: $t_{v\ seg\ 1} = 18$ s

Verde de segurança de GM2: $t_{v\ seg\ 2} = 18$ s

Verde de Segurança de GM3: $t_{v\ seg\ 3} = 12$ s

Tempos de amarelo – calculados de acordo com a Equação 6.4 (ver Capítulo 6)

Tempo de amarelo de GM1: $t_{am,\ 1} = 4$ s

Tempo de amarelo de GM2: $t_{am,\ 2} = 4$ s

Tempo de amarelo de GM3: $t_{am,\ 3} = 3$ s

Tempos de Vermelho Geral: calculados de acordo com a Equação 6.4 (ver Capítulo 6)

Tempo de vermelho geral de GM1: $t_{vg,\ 1} = 1$ s

Tempo de vermelho geral de GM2: $t_{vg,\ 2} = 1$ s

Tempo de vermelho geral de GM3: $t_{vg,\ 3} = 3$ s

ETAPA II: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa II da programação semafórica, mostrada no item 7.1.2. Esses dados foram obtidos a partir de levantamentos de campo.

Taxa de fluxo de cada grupo de movimentos

Rua I (sentido centro/bairro): F_1 = 2660 veíc/h;

Rua I (sentido bairro/centro): F_2 = 1330 veíc/h;

Rua J: F_3 = 1120 veíc/h.

Fluxo de saturação (FS)

Rua I (sentido centro/bairro): FS_1 = 5220 veíc/h;

Rua I (sentido bairro/centro): FS_2 = 5150 veíc/h;

Rua J: FS_3 = 3480 veíc/h.

Tempo perdido inicial e final de cada grupo de movimentos

Neste exemplo, considerou-se o tempo perdido de cada grupo de movimentos como sendo igual ao seu tempo de entreverdes.

ETAPA III: As atividades desta etapa correspondem àquelas descritas no item 8.6.1.

[a] – Definir estratégia de atuação

Em função da alta saturação verificada no local durante o horário de abrangência do plano, será adotada a estratégia de corte ótimo.

[b] – Estágio dispensável? Estágio de demanda prioritária?

Não há estágios dispensáveis ou dependentes de demanda prioritária no local.

[c] – Determinação do verde máximo

O cálculo da programação semafórica em tempos fixos será feito adotando-se grau de saturação máximo igual a 0,9 (item 6.9.1), o que conduz ao tempo de ciclo de 142 s. O item [c] da Etapa I definiu um tempo de ciclo máximo igual 140 segundos. Portanto, não **deverá** ser aplicada a Equação 8.10 e o tempo de ciclo a ser adotado é igual ao tempo de ciclo máximo.

Para o tempo de ciclo de 140s, os valores correspondentes de tempo de verde máximo são:

Tempo de verde máximo para o estágio 1: $t_{v\ max.,\ 1}$ = 79 s

Tempo de verde máximo para o estágio 2: $t_{v\ max,\ 2}$ = 50 s

[j] – Determinação da extensão de verde

Como foi adotada a estratégia de corte ótimo na atividade [a] desta etapa, a extensão de verde será definida a partir dos valores propostos na Tabela 8.1 e precede a atividade de locação da seção de detecção (atividade ***[d]***).

Portanto, como a Rua I, que é atendida pelo Estágio 1, possui três faixas de rolamento em sua aproximação crítica, tem-se:

$t_{ev,1}$ = 1,0 s

Analogamente, como a Rua J, que é atendida pelo Estágio 2, apresenta duas faixas de rolamento, tem-se:

$t_{ev,2}$ = 1,8 s

[d] – Locação da seção de detecção

Em função das peculiaridades do local, levantadas na atividade *[a]* da Etapa I, e da escolha da estratégia de corte ótimo, elaborou-se o projeto das seções de detecção mostrado na Figura 8.8.

A locação da seção de detecção para o estágio 1 (correspondente ao atendimento de GM1), é definida considerando $t_{ev,1}$ = 1,0 s, e a velocidade do fluxo igual a 15 m/s. Assim, a distância da seção de locação à linha de retenção é igual a 15 metros (1,0 X 15).

Para o estágio 2 (correspondente ao atendimento de GM3), a locação da seção de detecção é definida considerando $t_{ev,2}$ = 1,8 s, e a velocidade do fluxo igual a 10 m/s. Assim, a distância da seção de locação à linha de retenção é igual a 18 metros (1,8 X 10).

A definição da locação da seção de detecção para o atendimento do GM2 fica condicionada à programação de um plano semafórico onde este grupo de movimentos seja crítico.

Centro

Rua I

J

Distância a ser
calculada em função
de outro plano

1

1

15

Bairro

18

Rua

1

Legenda:

- seção de detecção

- linha de retenção medidas em metros

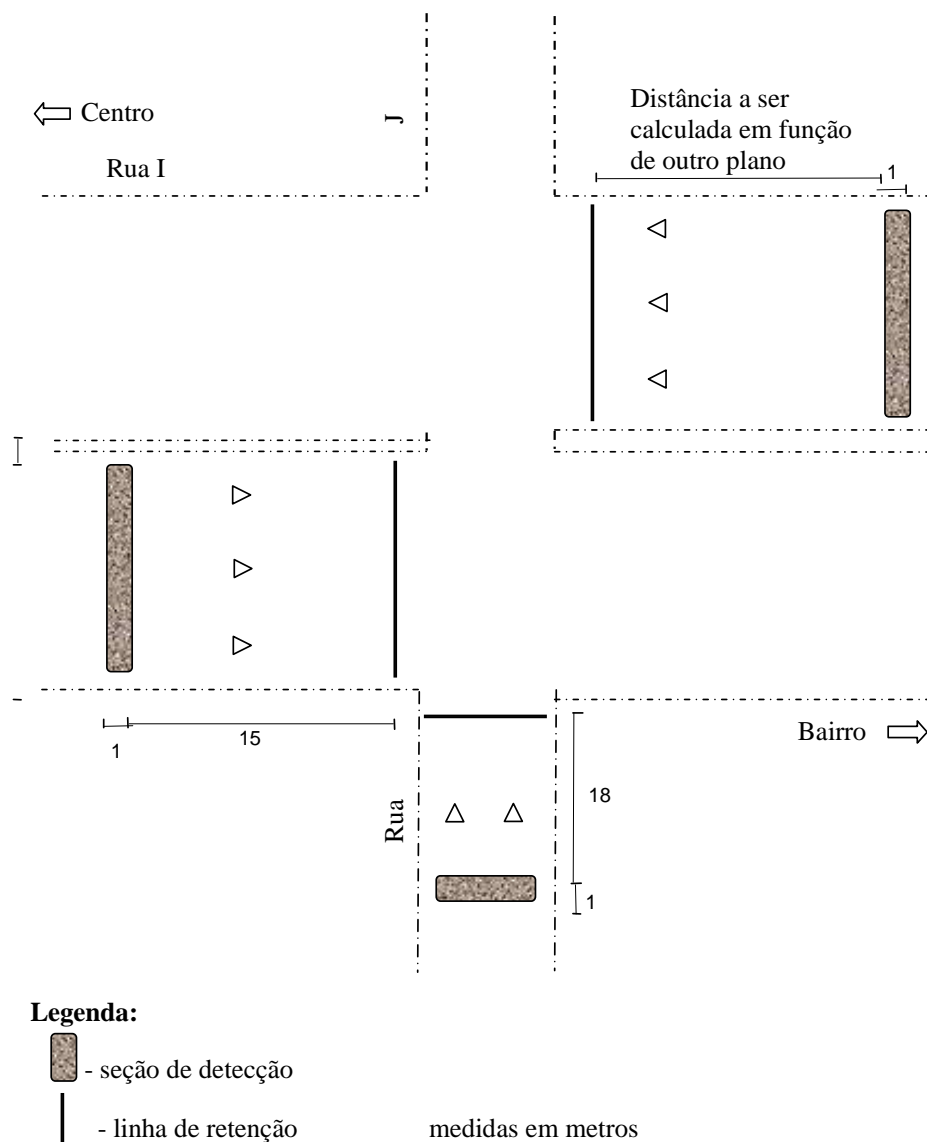



Figura 8.8: Posicionamento das seções de detecção

O cálculo da programação semafórica em tempos fixos apontou que o grupo de movimentos crítico no estágio 1 é GM1. Consequentemente, este estágio será comandado tão somente pela seção de detecção da aproximação centro/bairro da Rua I. A seção de detecção no sentido oposto **deverá** ser desativada durante o período de abrangência do plano em construção, ou seja, entre 6:30 h e 9:45 h, dos dias úteis (atividade [a] desta Etapa).

O estágio 2 será controlado pela seção de detecção da Rua J.

[e] – Determinação do verde mínimo

Estágio 1

A atividade [h] da Etapa I definiu que os grupos de movimentos GM1 e GM2 necessitam 18 s de verde de segurança. Então, em função da Equação 8.1, o verde mínimo do estágio 1 tem que ser igual ou maior do que 18 s.

A distância entre a seção de detecção e a retenção é de 15 m para GM1, que é o grupo de movimentos crítico do estágio 1. Aplicando a Equação (8.2), e considerando t_{pin} = 3 s, d = 15 m, esp = 6 m, e i_{FS} = 2,07 (3600/(5220/3)), tem-se que:

$$t_{vdmin,1} = 3 + \frac{15}{6} * 2{,}07$$

$$t_{vdmin,1} = 9\ s$$

O tempo de verde mínimo **deve** ser o maior valor dentre o calculado e o Verde de Segurança. Logo:

$t_{vd\ mín,1}$ = 18 s

Estágio 2

A atividade [h] da Etapa I definiu que o grupo de movimentos GM3 necessita 12 s de verde de segurança. Então, em função da Equação (8.1), o verde mínimo do estágio 2 **deve** ser igual ou maior do que 12 s.

GM3 tem uma distância entre a seção de detecção e a retenção igual a 18 m.

Aplicando a Equação (8.2), e considerando t_{pin} = 3 s, d = 18 m, esp = 6 m, e i_{FS} = 2,07 (3600/(3480/2)), tem-se que:

$$t_{vdmin,2} = 3 + \frac{18}{6} * 2{,}07$$

$$t_{vdmin,2} = 10\ s$$

O tempo de verde mínimo **deve** ser o maior valor dentre o calculado e o verde de segurança. Logo:

$t_{vd\ mín,2}$ = 12 s

[f] e [g] – Verde máximo > Verde mínimo

Os valores calculados para verde máximo, tanto para o estágio 1 como para o estágio 2, são maiores do que os correspondentes valores de verde mínimo.

[h] e [i] – Estágio tem duração fixa?

Como não há necessidade de impor duração fixa em nenhum estágio, a atividade [i] não se aplica.

[k] – Programação semafórica

Os valores encontrados para verde mínimo, verde máximo e extensão de verde para os dois estágios compõem a programação semafórica da interseção.

Estágio 1:

$t_{vd\ max,\ 1}$ = 79 s; $t_{vd\ mín,1}$ = 18 s; $t_{ev,1}$ = 1,3 s

Entreverdes = 5 s (amarelo = 4 s e vermelho geral = 1 s)

Estágio 2:

$t_{vd\ max,\ 2}$ = 50 s; $t_{vd\ mín,2}$ = 12 s; $t_{ev,2}$ = 1,9 s

Entreverdes = 6 s (amarelo = 3 s e vermelho geral = 3 s)

Etapa IV - Implantação da programação e avaliação dos resultados

As atividades a realizar nesta etapa são, basicamente, as mesmas relacionadas para as sinalizações semafóricas de tempos fixos descritas no item 7.1.4.

É conveniente enfatizar que geralmente são necessários ajustes práticos de campo na extensão de verde após a implementação da programação. Variações de um décimo de segundo acarretam mudanças consideráveis no desempenho da sinalização. A Equação (8.9) fornece uma primeira aproximação do valor correto, mas como se trata de um parâmetro extremamente sensível a um conjunto de condições locais, impraticável de considerar em equações analíticas, é indispensável efetuar tais ajustes.

Usualmente, os valores calculados para os parâmetros verde mínimo, através das Equações (8.1) e (8.2), e verde máximo apresentam bom desempenho em campo.

8.7.2 Sinalização semafórica semiatuada

Apresenta-se a seguir um exemplo de programação semafórica para o controle da interseção mostrada na Figura 8.9 com o uso de sinalização semafórica semiatuada.

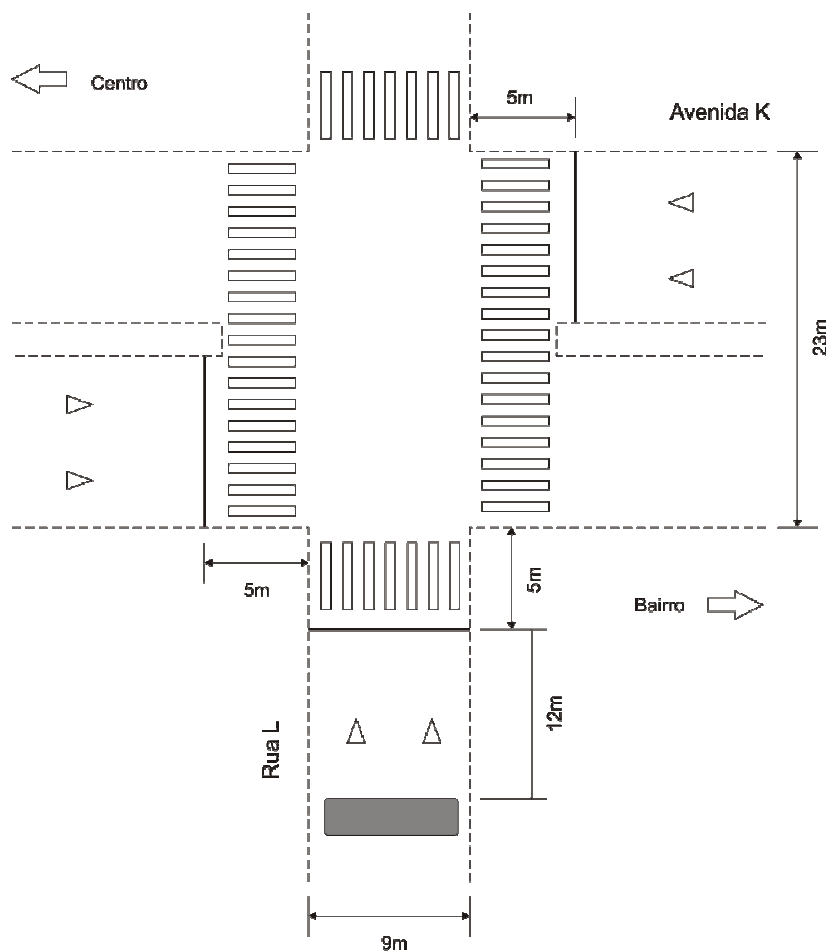



Figura 8.9: Cruzamento da Avenida K com Rua L

ETAPA I: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa I da programação semafórica, detalhada no item 7.1.1.

[a] Levantamento das características do local:

A interseção considerada é mostrada na Figura 8.9, onde constam as larguras de suas vias, em metros. Tanto cada uma das pistas da Avenida K como a Rua L possuem duas faixas.

No levantamento de campo, observou-se que preponderam veículos com comprimento igual a 4 metros e com espaçamento (*esp*) igual a 6m.

A velocidade regulamentada da Avenida K é de 60 km/h (16,7m/s) e da Rua L é de 40 km/h (11,1m/s). A partir desses dados e da análise das condições de segurança do local, foram adotadas as velocidades médias observadas, de 54 km/h (15,0 m/s) para Avenida K e de 40 km/h (11,1 m/s) para a Rua L.

[b] Período de abrangência: o plano a ser programado entrará em operação no período das 13:30 h às 21:30 h, dos dias úteis.

[c] Tempo de ciclo máximo: deseja-se que o tempo de ciclo não ultrapasse o valor de 120 segundos.

[d] e [e] Estudo dos movimentos e determinação dos grupos de movimentos:

A análise das características de trânsito do local conduziu à seguinte distribuição:

Grupo de movimentos 1 (GM1): conjunto de movimentos que se aproximam da interseção pela aproximação da Avenida K, sentido centro/bairro;

Grupo de movimentos 2 (GM2): conjunto de movimentos que se aproximam da interseção pela aproximação da Avenida K, sentido bairro/centro;

Grupo de movimentos 3 (GM3): conjunto de movimentos que se aproximam da interseção pela aproximação da Rua L;

[f] Definição do diagrama de estágios: foi adotada a configuração apresentada na Figura 8.10.

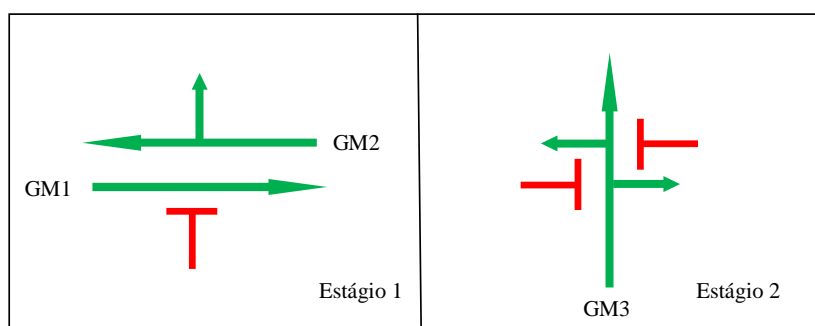



Figura 8.10: Diagrama de estágios

[g] Definição dos grupos semafóricos: a Figura 8.11 mostra a distribuição dos grupos semafóricos G1 e G2 entre os grupos de movimentos.

G2
G1
G1

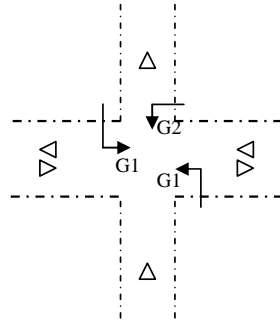



Figura 8.11: Distribuição dos grupos semafóricos

Grupo semafórico G1: Avenida K, ambos os sentidos, para os grupos de movimentos 1 e 2.

Grupo semafórico G2: Rua L para o grupo de movimentos 3.

[h] Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos:

Tempos de verde de segurança – definidos em função das características do local, de acordo com a orientação do item 6.14:

Verde de segurança de GM1: $t_{Vd\ seg\ 1}$ = 16 s

Verde de segurança de GM2: $t_{Vd\ seg\ 2}$ = 14 s

Verde de segurança de GM3: $t_{Vd\ seg\ 3}$ = 12 s

Tempos de amarelo– calculados de acordo com a Equação 6.4 (ver Capítulo 6)

Tempo de amarelo de GM1: $t_{am,\ 1}$ = 4 s

Tempo de amarelo de GM2: $t_{am,\ 2}$ = 4 s

Tempo de amarelo de GM3: $t_{am,\ 3}$ = 3 s

Tempos de vermelho geral: calculados de acordo com a Equação 6.5(ver Capítulo 6)

Tempo de vermelho geral de GM1: $t_{vg,\ 1}$ = 1 s

Tempo de vermelho geral de GM2: $t_{vg,\ 2}$ = 1 s

Tempo de vermelho geral de GM3: $t_{vg,\ 3}$ = 3 s

ETAPA II: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa II da programação semafórica, mostrada no item 7.1.2. Esses dados foram obtidos a partir de levantamentos de campo.

Taxa de fluxo de cada grupo de movimentos

Avenida K (sentido centro/bairro): F_1 = 1400 veíc/h ;

Avenida K (sentido bairro/centro): F_2 = 2200 veíc/h ;

Rua L: F_3 = 50 veíc/h.

Fluxo de saturação

Avenida K (sentido centro/bairro): FS_1 = 3500 veíc/h ;

Avenida K (sentido bairro/centro): FS_2 = 3500 veíc/h ;

Rua L: FS_3 = 3000 veíc/h.

Tempo perdido inicial e final de cada grupo de movimentos

Foram medidos os seguintes valores:

Para estágio 1:

$t_{pin_1} =$ 3s e t_{pfn_1} = 3s

Para estágio 2:

$t_{pin_2} =$ 3s e t_{pfn_2} = 3s

ETAPA III: Determinação da programação semafórica.

Em função da vistoria efetuada na Etapa I, item a), decidiu-se pela implantação da seção de detecção da Rua L a uma distância igual a 12 metros da respectiva linha de retenção (ver Figura 8.9).

A aplicação do método do grau de saturação, adotando-se grau de saturação máximo igual a 0,80, levou aos seguintes resultados:

Tempo de ciclo = 64s

Portanto:

- ✓ tempo do ciclo de referência = 64s
- ✓ tempo do verde de referência do estágio 1 = 51s
- ✓ tempo do verde de referência do estágio 2 = 2s

Observe-se que não foi atendido o verde de segurança do grupo de movimentos GM3, associado ao grupo semafórico G2. Assim, **deve-se** recalcular a programação a fim de que esse limite seja obedecido. Para isso, empregar-se-á o método 2, descrito em 6.14.1 (equação 6.17), impondo-se o grau de saturação de 0,80 para GM2, o que conduz aos seguintes valores:

Tempo de ciclo: 114s

Tempo de verde real do estágio 1= 91s

Tempo de verde real do estágio 2 = 12 s

Estes serão os valores adotados para o tempo de ciclo de referência e os tempos de verde de referência, tendo em vista que atendem tanto o tempo de ciclo máximo como os verdes de segurança.

Verde máximo

O conceito de verde máximo não se aplica ao estágio 1 (estágio não atuado).

O verde máximo do estágio 2 é igual ao seu tempo de verde de referência, que é de 12 s.

Verde mínimo

O verde mínimo do estágio 1 **deverá** ser igual ao correspondente tempo de verde de referência, que é igual a 91s.

O verde mínimo do estágio 2 **deve** obedecer a dois requisitos:

a) não ser inferior ao verde de segurança de GM3. Consequentemente, o verde mínimo do estágio 2 não pode ser menor do que 12 s;

b) assegurar a passagem de todos os veículos que podem vir a se encontrar, no princípio do estágio, entre a linha de retenção e a seção detectada; essa condição está assegurada ao aplicar-se a Equação 8.2:

$$t_{vdmin} = t_{pin} + \frac{d}{esp} * i_{FS}$$

Considerando que:

t_{pin}= 3 s (tempo perdido inicial do estágio 2, medido na Etapa II)

d = 12 m (distância da seção de detecção à linha de retenção)

esp = 6 m

i_{FS} = 3600/1500 = 2,4 s (Fluxo de Saturação = 3000 veíc/h na Etapa II, o que corresponde a 1500 veíc/(faixa*h))

$$t_{vd\ \min,2} = \quad 3 + \frac{12}{6} \times 2{,}4$$

Isto é: $t_{vd\ \min,\ 2} = \quad 7{,}8\ s$

Consequentemente, o verde mínimo do estágio 2 será definido como sendo igual a 12 s a fim de poder cumprir simultaneamente às duas exigências anteriores.

Ressalte-se que os valores de verde mínimo e verde máximo do estágio 2 coincidiram, o que é aceitável.

Extensão de verde

Como os valores de verde mínimo e de verde máximo coincidiram, não faz sentido falar em extensão de verde. Entretanto, para fins didáticos, será apresentado, a seguir, o encaminhamento que seria dado se o verde máximo tivesse resultado superior ao verde mínimo.

De acordo com a estratégia de passagem, a extensão de verde do estágio 2 seria igual ao tempo de percurso entre a seção detectada e a linha de retenção.

Como a distância da seção de detecção até a linha de retenção é igual a 12 m e a velocidade da Rua L é de 11,1 m/s, o tempo de percurso é determinado por:

$$t_p = \frac{12}{11{,}1}$$

Portanto t_p é igual a 1,1 s, o que remete a que, nesta situação hipotética considerada, a Extensão de Verde do estágio 2 também seria igual a 1,1 s.

Tempo de retardo

O tempo de retardo, calculado pela Equação 8.11, é igual a:

$t_r = 1{,}1$ s $\rightarrow$ Adotar $t_r = 2$ s

Programação semafórica

Compõem a programação semafórica do controle semiatuado para o cruzamento exemplificado:

Tempo mínimo de verde do estágio 1= 91s;

Entreverdes do estágio 1 = 5 s (amarelo = 4 s e vermelho geral = 1 s);

Tempo mínimo de verde do estágio 2 = 12 s;

Tempo máximo de verde do estágio 2 = 12 s;

Entreverdes do estágio 2 = 6 s (amarelo = 3 s e vermelho geral = 3 s);

Tempo de retardo do estágio 2 = 2 s.

ETAPA IV: Implantação da programação e avaliação dos resultados

As atividades que **devem** ser executadas nessa etapa são, basicamente, as mesmas relacionadas para as sinalizações semafóricas de tempos fixos descritas no item 7.1.4.

8.7.3 Sinalização semafórica de pedestres em meio de quadra

Apresenta-se a seguir um exemplo de programação semafórica semiatuada para o controle da travessia de pedestres mostrada na Figura 8.12.

Centro

Avenida M

19 m

Bairro

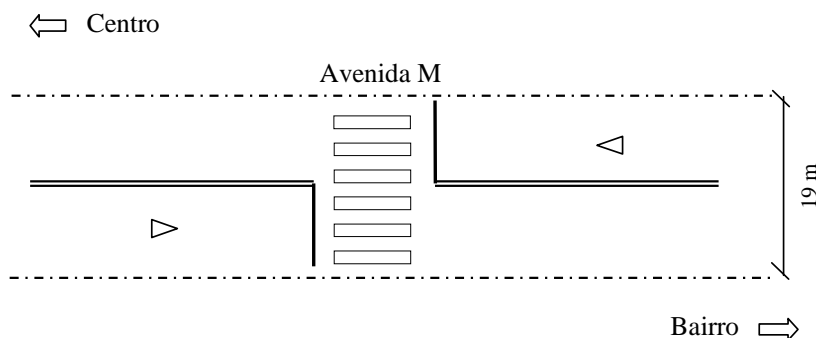



Figura 8.12: Travessia de pedestres de meio de quadra na Avenida M

ETAPA I: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa I da programação semafórica, detalhada no item 7.1.1.

[a] Levantamento das características do local:

A travessia considerada é mostrada na Figura 8.12, onde consta a largura da Avenida M, em metros.

A velocidade regulamentada da Avenida M é de 50 km/h e a velocidade média observada foi de 45 km/h (12,5 m/s) para os dois grupos de movimentos da Avenida M.

No levantamento de campo, observou-se que preponderam veículos com comprimento igual a 4 metros.

[b] Período de abrangência: o plano a ser programado irá operar diariamente, no período das 05:30 h às 23:30 h.

[c] Tempo de ciclo máximo: deseja-se que o tempo de ciclo não ultrapasse o valor de 120 segundos.

[d] e [e] Estudo dos movimentos e determinação dos grupos de movimentos:

A análise das características de trânsito do local conduziu à seguinte distribuição dos movimentos veiculares:

Grupo de movimentos 1 (GM1): movimento na Avenida M sentido centro/bairro;

Grupo de movimentos 2 (GM2): movimento na Avenida M sentido bairro/centro;

O movimento de pedestres, nos dois sentidos, é o MP1.

[f] Definição do diagrama de estágios: a Figura 8.13 ilustra o diagrama de estágios.

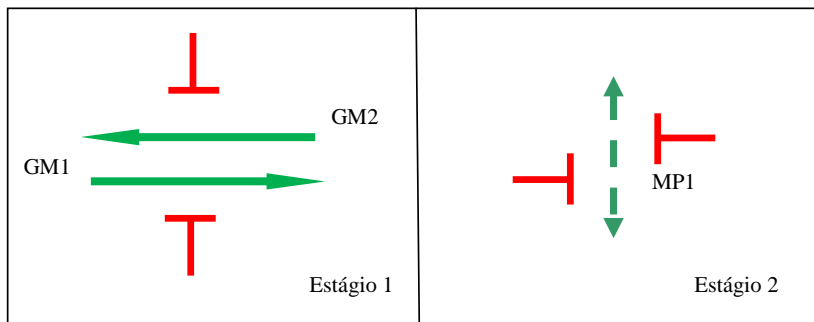



Figura 8.13: Diagrama de estágios

[g] Definição dos grupos semafóricos: A Figura 8.14 mostra a distribuição dos grupos semafóricos G1 e G2.

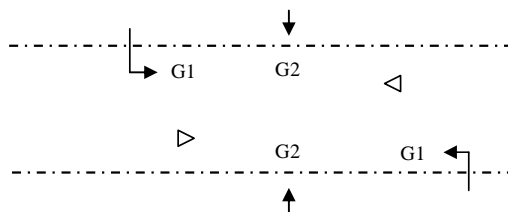



Figura 8.14 - Distribuição dos grupos semafóricos

Grupo semafórico G1: Avenida M, ambos os sentidos, para os grupos de movimentos 1 e 2.

Grupo semafórico G2: Para o movimento MP1, de pedestres.

[h] Determinação dos parâmetros de segurança dos grupos de movimentos:

Tempos de verde de segurança

Verde de segurança de GM1: $t_{Vd\ seg\ 1} = 20$ s

Verde de segurança de GM2: $t_{Vd\ seg\ 2} = 20$ s

Tempos de amarelo

Tempo de amarelo de GM1: $t_{am,\ 1} = 4$ s

Tempo de amarelo de GM2: $t_{am,\ 2} = 4$ s

Tempos de vermelho geral

Adotando-se, para ambos os sentidos, a distância entre a linha de retenção e o final da faixa (no sentido do fluxo) igual a 8 m, o comprimento observado dos veículos igual a 4 m e a velocidade igual a 12,5 m/s, resultou:

Tempo de vermelho geral de GM1: $t_{vg,\,1} = 1s$

Tempo de vermelho geral de GM2: $t_{vg,\,2} = 1s$

ETAPA II: Os dados a seguir apresentados correspondem à Etapa II da programação semafórica, mostrada no item 7.1. Esses dados foram obtidos a partir de levantamentos de campo.

Taxa de fluxo de cada grupo de movimentos

Avenida M (sentido centro/bairro): F_1 = 2000 veíc/h ;

Avenida M (sentido bairro/centro): F_2 = 1900 veíc/h ;

Fluxo de saturação

Avenida M (sentido centro/bairro): FS_1 = 3700 veíc/h ;

Avenida M (sentido bairro/centro): FS_2 = 3700 veíc/h ;

Tempo perdido inicial e final de cada grupo de movimentos

Neste exemplo, considerou-se o tempo perdido de cada grupo de movimentos como sendo igual ao seu tempo de entreverdes.

Pedestres

Velocidade de travessia dos pedestres, medida no local de travessia: 1,1 m/s

ETAPA III: Determinação da programação semafórica.

Em função das observações levantadas na Etapa I, adotou-se que o tempo de verde para a travessia de pedestres, ou seja, o tempo de verde do estágio 2 é igual a 6s (item 8.5.2).

Tempo de vermelho intermitente para o estágio 2:

De acordo com a Equação 6.6, o intervalo vermelho intermitente (entreverdes) para o estágio que serve aos pedestres foi calculado por:

$$t_{ent} = 1 + \frac{19}{1,1} = 18,3\,s$$

Adotar:

t_{ent} = 19 s

Após o vermelho intermitente deve ser previsto um intervalo de vermelho geral, conforme consta no item 6.7.2. Neste exemplo, adotou-se o valor de 1,0 s para o vermelho geral.

Portanto, o estágio 2 tem duração de 26 s (6 de verde,19 de vermelho intermitente e 1 de vermelho geral).

Para o cálculo do tempo de ciclo de referência, foi aplicado o método do grau de saturação, utilizando os seguintes valores:

Grau de saturação máximo = 0,75

Tempo perdido total (T_p) = 5+ 26 (entreverdes veicular + tempo do estágio de pedestres) = 31s

p_A = (2000/3700)/0,75 = 0,72

Portanto, o tempo de ciclo de referência foi calculado por:

$$t_c = \frac{31}{1-0,72} = 111\text{s}$$

Tempo de ciclo de referência: 111s

Tempo de entreverdes do estágio 1 = 5s

Tempo de verde do estágio 2 = 6 s

Tempo de entreverdes do estágio 2 (vermelho intermitente + vermelho geral) = 20 s

Tempo de verde real mínimo do estágio 1 = 111 - 5 – 6 – 20 = 80s

Considerando-se que os valores calculados atendem simultaneamente o tempo de ciclo máximo e os verdes de segurança, eles foram adotados como tempo de ciclo de referência e tempos de verde de referência.

O tempo de verde de referência do estágio 1 é o tempo mínimo de verde que este estágio irá receber entre o atendimento de duas detecções sucessivas feitas pelos pedestres.

Nesse exemplo, a indicação verde para os veículos é mantida constante até que ocorra uma solicitação pelos pedestres.

Tempo de retardo

A partir das observações feitas em campo durante a Etapa I, foi adotado o tempo de retardo de 5 s para o estágio 2 (item 8.4.4), a fim de que o pedestre possa atravessar com mais segurança.

Programação semafórica

Compõem a programação semafórica do controle semiatuado para a travessia de pedestres exemplificada:

Verde mínimo para o estágio 1 = 80s;

Entreverdes do estágio 1 = 5s (amarelo = 4 s e vermelho geral = 1s);

Verde do estágio 2 = 6 s;

Vermelho intermitente do estágio 2 = 19s;

Vermelho geral após o intermitente = 1s;

Tempo de retardo = 5s

Os diagramas de barras apresentados nas Figuras 8.15 e 8.16 trazem a representação do resultado prático da implementação dessa programação no caso do pedestre acionar a botoeira após transcorridos:

(a) até 75s do tempo de verde para o estágio 1 (o diagrama da Figura 8.15 ilustra a situação em que a atuação ocorreu a 60 segundos do início do verde veicular);

(b) mais de 75s do tempo de verde para o estágio 1 (o diagrama da Figura 8.16 ilustra a situação em que a atuação ocorreu a 120s do início do verde veicular).

Quando a atuação do pedestre ocorre em tempo igual ou inferior a 75s do início do verde do estágio 1, acrescentando-se a este tempo o tempo de retardo, tem-se que a detecção é efetivamente considerada pelo controlador em tempo igual ou inferior a 80s do início do verde veicular. Neste caso, o verde para o pedestre só é apresentado após a conclusão do verde mínimo do estágio 1, igual a 80s, e respectivo entreverdes. O tempo de ciclo fica igual ao tempo de ciclo de referência (111s).

No caso da atuação do pedestre ocorrer passados mais de 75s do início do verde veicular, acrescentando-se a este tempo o tempo de retardo (5s), a detecção é efetivamente considerada pelo controlador após transcorridos mais de 80s do verde do estágio 1 (tempo mínimo de verde desse estágio). Neste caso, o verde para o pedestre é apresentado logo após a passagem do tempo de retardo e do entreverdes do estágio 1. O tempo de ciclo é superior ao tempo de ciclo de referência.

tempo de retardo (5s)
instante do acionamento da botoeira
instante em que a detecção é considerada pelo controlador

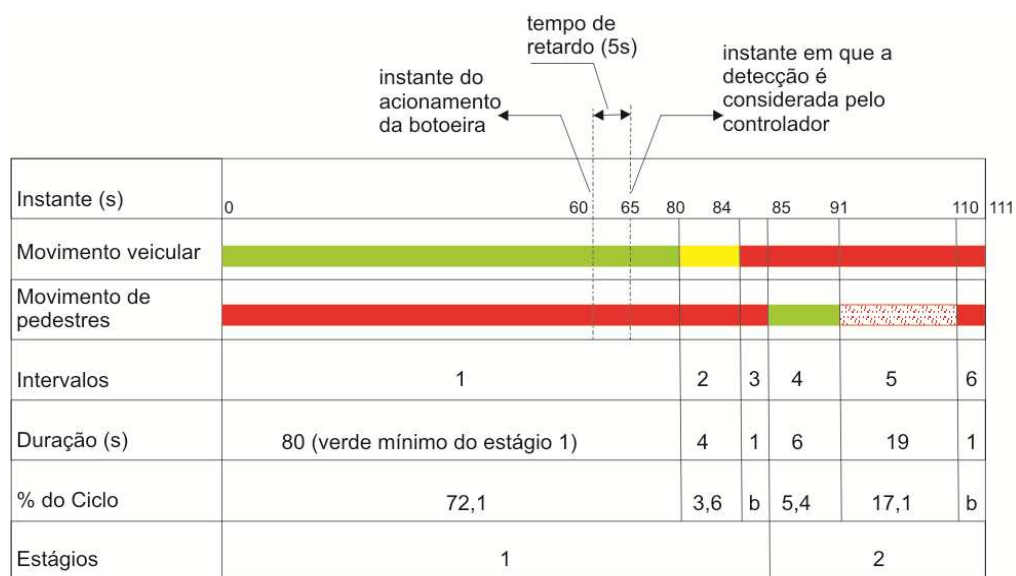
Instante (s)	0 60 65 80	84	85	91	110	111
Movimento veicular						
Movimento de pedestres						
Intervalos	1	2	3	4	5	6
Duração (s)	80 (verde mínimo do estágio 1)	4	1	6	19	1
% do Ciclo	72,1	3,6	b	5,4	17,1	b
Estágios	1			2		

onde b = 0,9

Figura 8.15 - Diagrama de barras referente à atuação do pedestre ocorrida a 60s do início do verde do estágio 1

tempo de retardo (5s)
instante do acionamento da botoeira
instante em que a detecção é considerada pelo controlador
verde mínimo do estágio 1

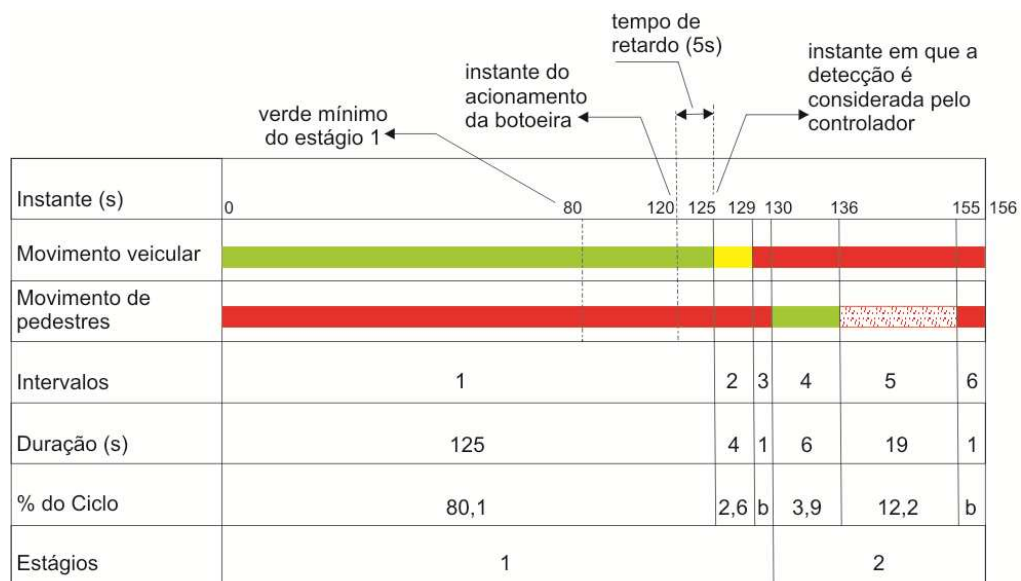
Instante (s)	0 80 120 125	129	130	136	155	156
Movimento veicular						
Movimento de pedestres						
Intervalos	1	2	3	4	5	6
Duração (s)	125	4	1	6	19	1
% do Ciclo	80,1	2,6	b	3,9	12,2	b
Estágios	1			2		

onde b = 0,6

Figura 8.16 - Diagrama de barras referente à atuação do pedestre ocorrida a 120s do início do verde do estágio 1

ETAPA IV: Implantação da programação e avaliação dos resultados

As atividades que **devem** ser executadas nessa etapa são, basicamente, as mesmas relacionadas para a sinalização semafórica de tempo fixo descritas no item 7.1.4.

8.8 Locais candidatos à implantação de sinalização semafórica isolada atuada

Atendidos os critérios estabelecidos para a implantação de sinalização semafórica, algumas situações específicas justificam o uso de controle atuado pelo tráfego. A seguir são apresentadas recomendações gerais para o uso desse tipo de controle.

8.8.1 Sinalização semafórica totalmente atuada

O tipo totalmente atuado pode ser empregado tanto em locais com grau de saturação baixo como alto, desde que seja escolhida a programação apropriada.

Sua adoção é recomendada para o controle de interseções onde o volume do tráfego sofre variações contínuas ao longo do tempo (hora, dia, dia da semana, etc), dificultando seu controle por meio de programação por tempo fixo, mesmo com o recurso de diferentes planos.

Para o estágio atuado onde é adotada a estratégia de corte ótimo para a determinação da extensão de verde, quanto mais a demanda do seu movimento crítico se aproximar de um padrão aleatório, melhor será o aproveitamento da atuação semafórica. Por isso, a proximidade de outra interseção semaforizada (com controle atuado ou não) pode comprometer a eficácia do controle atuado.

8.8.2 Sinalização semafórica semiatuada

A seguir são apresentadas algumas situações propícias à utilização de sinalização semafórica semiatuada, desde que o estudo inicial da interseção tenha apontado para a necessidade de implantação de sinalização semafórica.

a) Interseção com via secundária de baixo volume

Configura-se uma situação típica de semiatuação com estágio dispensável para a via secundária quando:

- ✓ os volumes da via principal e da secundária forem muito desequilibrados, com o volume da via principal muito elevado em relação ao da secundária; e
- ✓ a soma dos volumes das aproximações da via secundária for inferior a 100 veículos por hora, durante, no mínimo, oito horas de um dia típico (não necessariamente consecutivas). Se o volume for maior do que esse valor, a tendência será de que o estágio dispensável seja acionado a todo ciclo, tornando necessário verificar se convém que a sinalização semafórica opere como atuada ou em tempo fixo.

Em algumas situações o estágio da via secundária representa a única oportunidade prática para assegurar a travessia da via principal pelos pedestres. Nesses casos, a utilização do estágio dispensável para a via secundária pode não ser recomendada. O técnico **deverá**

estudar outras possibilidades de controle, dentre as quais, implantar um estágio dispensável específico para o atendimento dos pedestres, ou utilizar sinalização semafórica de tempo fixo.

b) Conversão à esquerda junto ao canteiro central

O uso de estágio dispensável para o controle da conversão à esquerda é recomendável quando o fluxo de conversão for inferior a 100 veículos por hora, durante, no mínimo, oito horas de um dia típico (não necessariamente consecutivas).

c) Saída de veículos de uma edificação lindeira

Saídas de veículos de alguns tipos de edificações lindeiras, tais como terminais de ônibus, postos de bombeiros, grandes áreas de estacionamento, etc. podem apresentar trânsito concentrado somente em alguns momentos e/ou demanda eventual. Essas características recomendam a utilização de controle semiatuado.

Em alguns desses casos, como no atendimento de demanda prioritária (ver item 8.5.4), a sinalização semafórica semiatuada pode ser implantada mesmo quando o volume de tráfego no local não justifique a implantação de sinalização semafórica.

d) Travessia de pedestres em meio de quadra

Em travessias de meio de quadra o uso de botoeiras para acionar o estágio de pedestres é recomendado quando este estágio for dispensável em algum período do dia. Esta questão **deverá** ser analisada pelo técnico em função das características do fluxo veicular e de pedestres no local.

e) Interseção com estágio exclusivo de pedestres

Em interseção com estágio exclusivo de pedestres, o uso de botoeiras para acionar o estágio de pedestres é recomendado quando este estágio for dispensável em algum período do dia. Esta questão **deverá** ser analisada pelo técnico em função das características do fluxo veicular e de pedestres no local.

9 . COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

A coordenação semafórica tem como objetivo melhorar o desempenho da circulação de veículos e/ou pedestres em rede aberta ou fechada (ver item 9.2). As principais características da operação em rede foram apresentadas no Capítulo 5, item 5.2.2.

Conforme apresentado no Capítulo 5, a programação da sinalização semafórica na operação em rede inclui, além dos parâmetros referentes à programação da operação isolada, a determinação da defasagem. Este é, portanto, o parâmetro que caracteriza a presença de coordenação semafórica.

O valor da defasagem é estabelecido em função de um dos seguintes tipos de referência temporal:

- ✓ o início do tempo de verde de um dos estágios da interseção imediatamente a montante (defasagem relativa entre interseções sucessivas), como ilustrado na Figura 9.1;
- ✓ o início do tempo de verde de um dos estágios de uma única interseção da rede, previamente definida, que serve de referência para as defasagens de todas as interseções da rede (defasagem absoluta de cada interseção), como mostrado na Figura 9.2;
- ✓ uma referência virtual (instante de início da contagem do tempo, não associado a nenhum estágio específico), que pode ser usada quando a programação da operação em rede é realizada por meio de programas computacionais (defasagem absoluta de cada interseção).

O valor da defasagem, sempre expresso em relação ao início do verde, pode ser calculado tomando por base: (i) os inícios dos intervalos de verde dos estágios considerados em duas interseções vizinhas; (ii) os términos dos intervalos de verde dos estágios considerados em duas interseções vizinhas; (iii) outro ponto de referência desses intervalos de verde como, por exemplo, o ponto central da sua duração.

Neste capítulo somente é abordada a defasagem calculada com referência ao início do tempo de verde, que é a mais utilizada nas aplicações práticas.

Ao estabelecer a defasagem fica definido o momento de iniciar o verde de cada estágio nas interseções que integram a rede, tomando como base a referência temporal especificada.

A Figura 9.1 ilustra o conceito de defasagem no caso da coordenação da sinalização semafórica de duas interseções, tomando por base o início do tempo de verde para o estágio que serve o movimento em frente na primeira interseção.

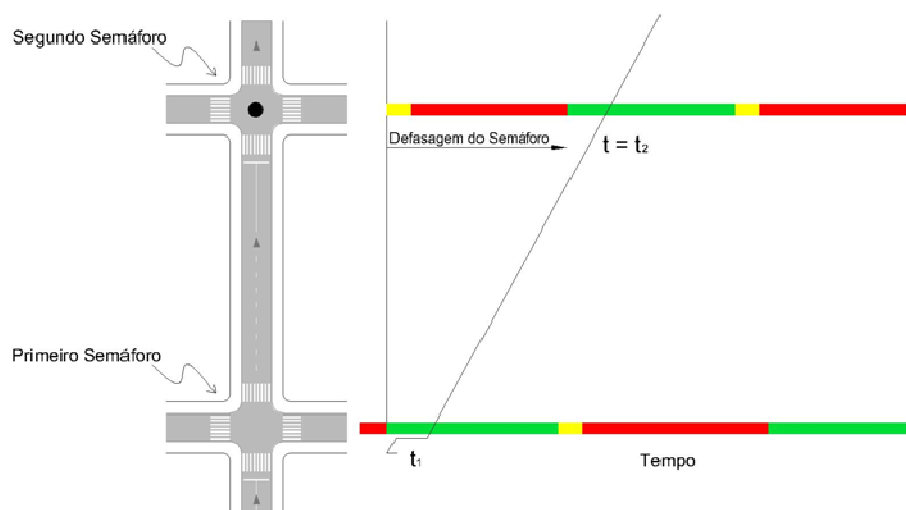



Figura 9.1: Representação do conceito de defasagem relativa entre duas interseções sucessivas

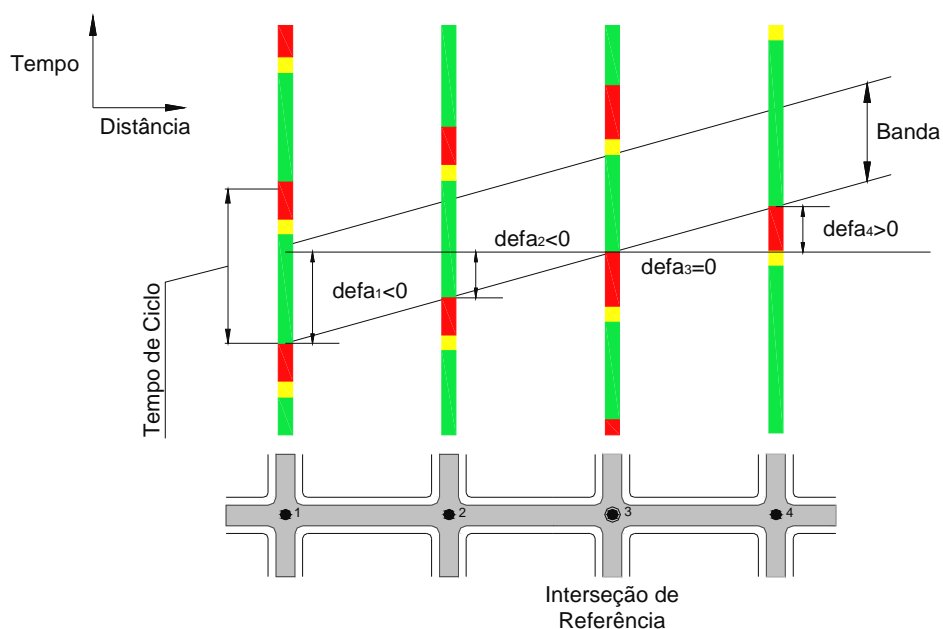



Figura 9.2: Representação do conceito de defasagem absoluta

Neste capítulo são detalhados alguns dos aspectos referidos no Capítulo 5 sobre a coordenação semafórica na operação em rede e são apresentados os procedimentos para a programação da sinalização semafórica envolvida.

9.1 Aspectos gerais da coordenação semafórica

A coordenação semafórica traz benefícios principalmente nas situações em que o deslocamento dos veículos entre interseções sucessivas ocorre na forma de pelotões. O deslocamento em pelotões depende da combinação de diferentes fatores, dentre os quais o espaçamento das interseções controladas (ver Figura 6.8).

9.1.1 Objetivos

Os principais objetivos da coordenação semafórica são:

- ✓ aumentar o conforto dos usuários e reduzir os congestionamentos mediante a redução do atraso e do número de paradas provocados pela passagem do tráfego veicular ao longo de um conjunto de interseções controladas por sinalização semafórica;
- ✓ evitar o bloqueio de interseções próximas entre si devido à ocorrência de filas com extensão superior à capacidade de armazenamento do trecho viário entre eles;
- ✓ em casos especiais, facilitar a circulação de pedestres em travessias sucessivas semaforizadas (coordenação baseada no estágio de pedestres das diferentes travessias);
- ✓ aumentar a segurança de pedestres por meio da coordenação de travessias semaforizadas de meio de quadra com interseções semaforizadas próximas;
- ✓ priorizar o tráfego de veículos de transporte público e de veículos de emergência ao longo de determinados itinerários;
- ✓ facilitar o controle da velocidade nas vias que integram a rede visando aumentar a segurança dos usuários.

9.1.2 Configuração das redes

Visando a eficácia da coordenação semafórica é preciso levar em conta qual a configuração adequada da rede para cada situação de controle.

Cabe ao técnico definir as interseções que deverão integrar cada rede, levando em conta as seguintes características:

- ✓ chegada de veículos em pelotão, que podem ser beneficiados pela inclusão da interseção na rede – esta situação ocorre, em geral, quando o espaçamento entre as interseções é inferior a 800m;
- ✓ diferença entre os tempos de ciclo calculados para operação de cada interseção no modo isolado – evitar que interseções com tempos de ciclo calculados muito diferentes entre si integrem a mesma rede. Vale ressaltar que interseções com tempo de ciclo muito baixo podem integrar uma rede com tempo de ciclo alto, desde que operando com ciclo duplo;
- ✓ posição das interseções em corredores, que recomendem sua operação coordenada, considerando, inclusive, as entradas e saídas intermediárias não semaforizadas;

- ✓ presença de travessia semaforizada de pedestres no meio de quadra, próxima da interseção;
- ✓ existência de rota para a circulação de veículos de transporte público e de emergência;
- ✓ espaçamento entre as interseções insuficiente para armazenar a fila gerada pela operação no modo isolado (possibilidade de bloqueio da interseção a montante);

Como regra prática, quando o espaçamento (em metros) entre duas interseções for numericamente inferior a 3 vezes o maior tempo de verde (em segundos) dessas interseções para a mesma corrente de tráfego, recomenda-se a inclusão das mesmas na rede coordenada.

Uma rede definida com base nas características anteriormente referidas pode ser válida apenas para determinados períodos do dia. Isto é, em algumas situações, a configuração das redes coordenadas pode variar ao longo do dia.

Para efeito de análise, a configuração de uma rede é representada por um conjunto de arcos (*links*) e nós. Os nós representam as interseções da rede e os arcos representam as ligações entre esses nós ou os acessos (arcos de entrada). É definido um arco para cada sentido de circulação do tráfego entre nós adjacentes.

A seleção da melhor configuração para uma rede coordenada depende da avaliação do desempenho da operação do tráfego sob diferentes configurações possíveis, estabelecidas pelo técnico com base no propósito da coordenação.

Para realizar tal avaliação são empregadas uma ou mais medidas de desempenho da operação do tráfego, sendo as mais comuns as apresentadas na seção 6.18 do Capítulo 6. Em alguns casos é possível avaliar em conjunto mais de uma medida de desempenho, por meio da definição de um índice agregado.

Um índice agregado bastante empregado para avaliar o desempenho do tráfego controlado por sinalização semafórica, denominado Índice de Desempenho (ID), avalia simultaneamente os valores de atraso e número de paradas. O ID pode ser determinado por diferentes expressões, como por exemplo a apresentada na Equação 9.1.

$$ID = \sum_{i=1}^{n} A_i + \frac{k_p}{3600} * NP_i \qquad (9.1)$$

em que,

ID = índice de desempenho [veic×h/h];

n = número de arcos da rede;

Ai – Atraso no arco i [veic×h/h];

NPi – Número de Paradas no arco i [veic/h];

kp –fator de transformação da grandeza número de paradas na grandeza atraso; expressa a importância de cada parada em termos de segundos de atraso e varia, normalmente, entre 20 e 30 segundos.

O exemplo mostrado no item 9.6.1 ilustra o procedimento recomendado para a escolha da melhor configuração da rede semafórica.

9.1.3 Aspectos que podem comprometer a eficácia da coordenação

Algumas características específicas da rede e do tráfego controlado podem dificultar a consecução dos objetivos estabelecidos para a coordenação semafórica, especialmente se não forem devidamente consideradas no cálculo das defasagens. Dentre elas:

- ✓ presença de estacionamento e/ou pontos de ônibus nas proximidades da aproximação, com impacto significativo sobre o fluxo de saturação correspondente;
- ✓ dispersão dos pelotões liberados em uma interseção ao longo do percurso até a linha de retenção da interseção a jusante levando em conta, inclusive, a composição do tráfego e a presença de estacionamento e/ou pontos de ônibus neste percurso;
- ✓ diferença entre os tempos de verde que atendem à mesma corrente de tráfego em interseções sucessivas;
- ✓ presença de fila na aproximação a jusante decorrente de volumes significativos de movimentos de conversão e/ou de entradas e saídas intermediárias de veículos.

9.2 Tipos de sistemas de coordenação semafórica

A coordenação semafórica é utilizada para o controle de redes abertas (usualmente denominado sistema de controle em corredor) e de redes fechadas (comumente referidos como sistema de controle em área). A Figura 9.3 ilustra os dois tipos de sistema de controle.

(a) Sistema de controle em corredor

(b) Sistema de controle em área

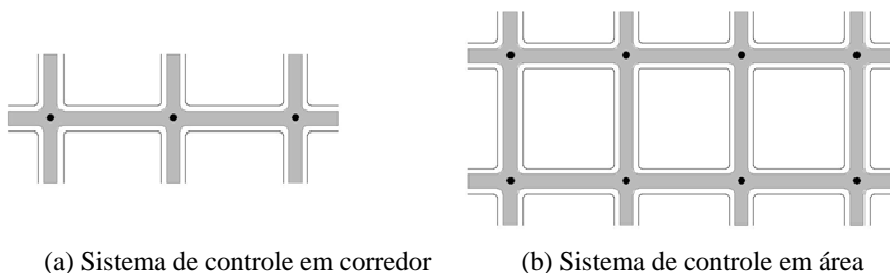



Figura 9.3: Tipos de sistemas de coordenação semafórica

No sistema de controle em corredor, o propósito é promover a coordenação semafórica entre interseções ao longo de um itinerário, usualmente realizado em via arterial. A via pode ter sentido único ou duplo de circulação do tráfego. Nesse caso, a coordenação visa a progressão contínua da corrente de tráfego em trecho contendo várias interseções, o que é comumente denominado “onda verde”.

No sistema de controle em área (rede fechada), interseções pertencentes a diferentes vias são coordenadas entre si e as defasagens são calculadas com base nos objetivos estabelecidos para

o controle. As vias que ligam as interseções da rede podem ter sentido único ou duplo de circulação do tráfego.

Embora todas as interseções da rede fechada devam se beneficiar da coordenação, é possível estabelecer níveis diferentes de prioridade para a operação de determinadas sequências de interseções (itinerários) dentro da rede.

9.3 Determinação da programação para coordenação de sinalizações semafóricas operando em tempo fixo

A determinação da programação semafórica de uma rede de sinalizações semafóricas coordenadas exige uma grande quantidade de cálculos, o que inviabiliza, na maioria das vezes, que possa ser resolvida satisfatoriamente por meio de processos manuais. Por isso, mesmo considerando que não existem maiores dificuldades em termos de complexidade teórica, deve-se reconhecer que as programações obtidas por meio de programas computacionais alcançam melhores resultados do que aquelas obtidas manualmente, principalmente quando se trata de coordenação em área e, em menor medida, coordenação em corredor de vias com mão dupla.

Os itens a seguir estabelecem os conceitos básicos da programação coordenada. Nos casos em que forem utilizados programas computacionais, esses conceitos são importantes para a sua parametrização. Nas situações em que a programação for realizada manualmente, seja porque a rede possui uma topologia simplificada, seja porque não existe a possibilidade de se recorrer a programas computacionais, tais conceitos podem orientar o técnico a elaborar essa programação.

9.3.1 Escolha do tempo de ciclo da rede

O tempo de ciclo da rede resulta do cálculo dos tempos de ciclo determinados para as interseções que a compõe. Para tanto, pode ser empregado o método do grau de saturação máximo ou o método de Webster, conforme apresentado no Capítulo 6 (item 6.9). Tempos de ciclo que foram determinados para atender o critério de verde de segurança (item 6.14.1) **não devem** influenciar na definição do tempo de ciclo da rede.

Denominam-se interseções críticas da rede aquelas que apresentarem os maiores valores de tempo de ciclo.

Como o tempo de ciclo **deve** ser único para todas as interseções da rede o seu valor **deve** ser o menor possível sem, contudo, causar congestionamento nas interseções mais saturadas.

Em termos práticos, recomenda-se que nenhum grupo de movimentos, de nenhuma interseção da rede, opere em um grau de saturação superior a 90% a fim de manter uma reserva capaz de absorver os efeitos provocados pela aleatoriedade de chegada dos veículos, por incidentes operacionais e por outros imprevistos. Quanto menor o grau de saturação adotado, maior a reserva de capacidade obtida. Apesar da importância dessa reserva de capacidade, utiliza-se um limite elevado, de 90%, visando reduzir a possibilidade de que as interseções menos saturadas da rede sejam obrigadas a operar com tempos de ciclo muito superiores às suas necessidades.

Em algumas interseções, visando aumentar a fluidez do tráfego, pode ser usado o recurso do ciclo duplo. Denomina-se ciclo duplo ao expediente de programar a sinalização semafórica de uma interseção para percorrer dois ciclos enquanto a sinalização semafórica mais crítica da rede percorre um único ciclo. Para que essa solução seja viável, o tempo de ciclo requerido pela interseção candidata **deve** ser igual ou menor do que a metade do tempo de ciclo da rede.

Existem programas computacionais que possuem seu próprio algoritmo para a determinação do tempo de ciclo da rede, em que outros elementos, além do grau de saturação máximo desejado, são considerados. Cabe ao técnico, a partir do entendimento dos critérios considerados pelo programa, decidir se o valor determinado pode ser adotado diretamente ou se necessita sofrer algum ajuste em função dos objetivos definidos para a programação semafórica.

9.3.2 Cálculo dos tempos de verde

A determinação dos tempos de verde para qualquer componente da rede é similar àquela empregada para o caso das interseções isoladas, descrita nas alíneas “f”, “g”, “h” e “j” do item 7.1.3, adotando-se o tempo de ciclo da rede para todas as interseções.

Diferentemente do recomendado para a programação das interseções isoladas, nas interseções em rede em que os cálculos conduzirem a um tempo de verde inferior ao tempo de verde de segurança, o tempo de ciclo **não deve** ser recalculado. Nesse caso, **deve-se:**

- ✓ fixar o tempo de verde do estágio em questão igual ao verde de segurança;
- ✓ passar a considerar esse verde como tempo perdido do ciclo; e
- ✓ repartir o tempo de verde efetivo total restante pelos outros estágios, proporcionalmente às respectivas taxas de ocupação.

9.3.3 Determinação das defasagens

Os itens seguintes apresentam alguns métodos que podem ser empregados para o cálculo do conjunto de defasagens de uma rede. Sua utilização, no entanto, é restrita a redes com topologia e condições de trânsito simplificadas.

Para situações mais complexas, sobretudo as referentes a sistemas de controle em área, a determinação das defasagens pode ser realizada com o auxilio de programas computacionais desenvolvidos para o cálculo da programação da sinalização semafórica de tempo fixo. A apresentação desses programas está fora do escopo do presente Manual.

9.3.3.1 Determinação da defasagem por meio de diagrama espaço-tempo

Um dos métodos empregados para a determinação das defasagens nos sistemas de controle em corredor, quando o principal propósito da coordenação semafórica é promover a progressão do tráfego ao longo de uma via, baseia-se em representação gráfica simplificada do deslocamento dos veículos, denominada diagrama espaço-tempo. Esta representação gráfica assume que não existem veículos em fila nas aproximações das interseções que integram a rede.

O esquema básico para a elaboração do diagrama espaço-tempo consiste na representação em escala adequada de todas as interseções controladas por sinalização semafórica ao longo do

seu eixo horizontal. No eixo vertical é representado, para cada interseção, o tempo de ciclo e os respectivos tempos de verde, amarelo e vermelho.

Exemplos de diagrama espaço-tempo referentes a uma via de sentido único de circulação (mão única) e a uma via com sentido duplo de circulação (mão dupla) são mostrados, respectivamente, nas Figuras 9.4 e 9.5. Nessas figuras, a linha diagonal tem inclinação igual à velocidade de progressão desejada, e o elemento identificado como "banda" representa o tempo de verde durante o qual um grupo de veículos percorrerá o trecho sem parar nas sinalizações semafóricas.

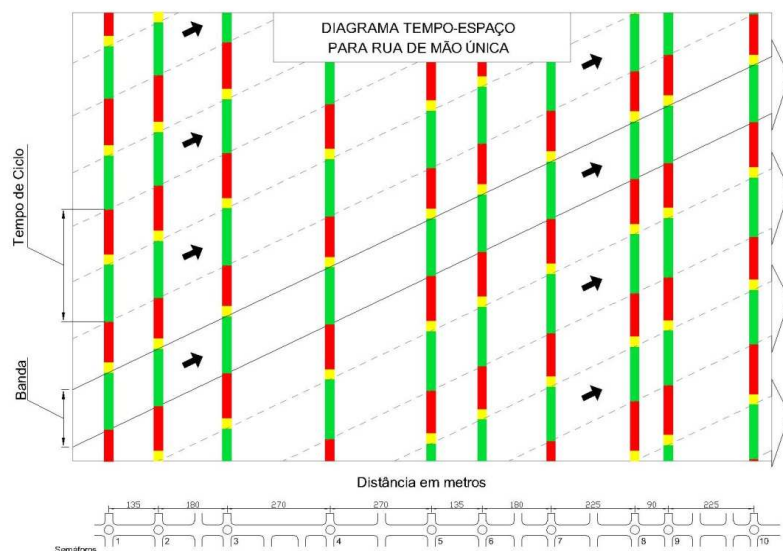



Figura 9.4: Exemplo de diagrama espaço-tempo para uma via de mão única

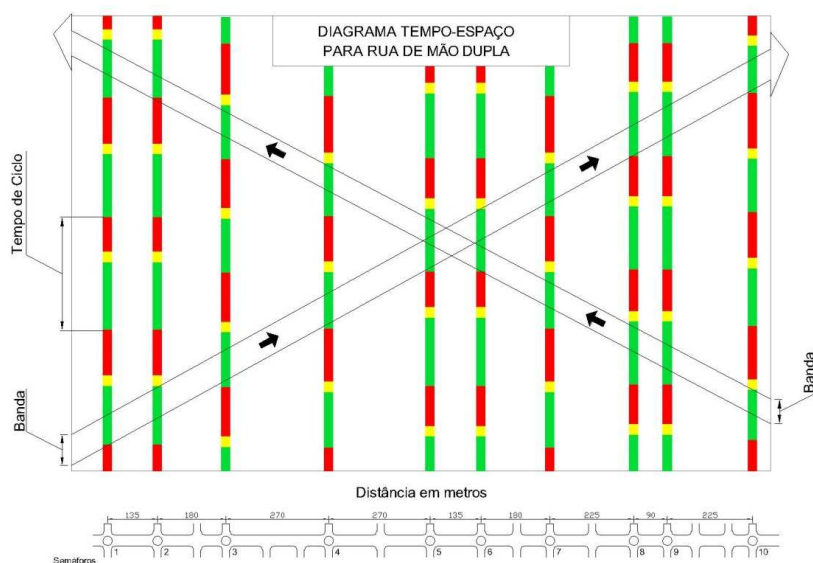



Figura 9.5: Exemplo de diagrama espaço-tempo para uma via de mão dupla

A elaboração do diagrama espaço-tempo parte dos seguintes elementos:

- ✓ tempo de ciclo da rede [s];
- ✓ tempo de verde e entreverdes de cada estágio para todas as interseções [s];
- ✓ velocidade de progressão desejada [m/s];
- ✓ distância entre as interseções da rede [m].

9.3.3.2 Alternativa para definição do valor da defasagem para vias de mão única

Considerando a elaboração do diagrama espaço-tempo, pode-se imaginar que em via com sentido único de circulação sempre é possível definir um valor de defasagem que leve a uma progressão perfeita do fluxo veicular entre duas interseções sucessivas. Isto é, que todos os veículos do movimento direto que passam na interseção a montante também transponham a interseção seguinte sem parar.

Entretanto, em diversas situações, a progressão ideal ("onda verde" perfeita) em vias de mão única não ocorre devido aos seguintes fatores:

- ✓ não-uniformidade dos perfis dos fluxos envolvidos;
- ✓ diferença entre os tempos de verde dos movimentos diretos entre as duas interseções;
- ✓ volumes elevados de conversão;
- ✓ entradas e saídas intermediárias de veículos;
- ✓ dispersão dos veículos.

A situação mais difícil de resolver é aquela em que o tempo de verde da interseção a jusante é menor do que o correspondente na interseção a montante. Essa situação é agravada na presença de volumes elevados de conversão na interseção a montante.

A partir da análise da Figura 9.6 é deduzida a expressão geral para o cálculo analítico da defasagem entre interseções sucessivas localizadas em vias com sentido único de circulação (mão única). Essa defasagem permite que o primeiro veículo que parte da interseção a montante passe pela interseção a jusante sem sofrer qualquer atraso, exatamente após o tempo de dissipação da fila, caso esta exista junto à aproximação da interseção a jusante. Ela é denominada "defasagem ideal".

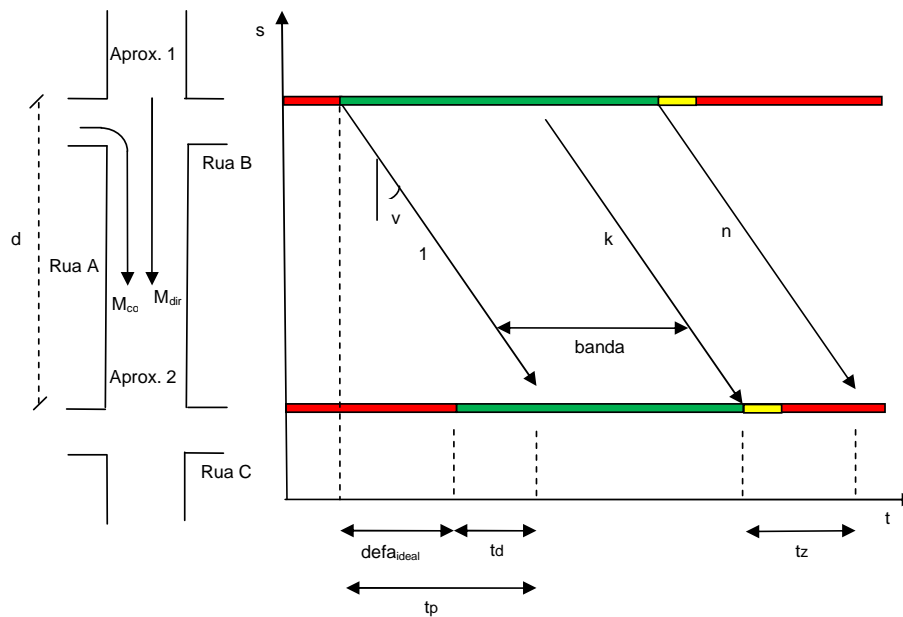



Figura 9.6: Elementos para o cálculo da defasagem para via de mão única

Os elementos apresentados na Figura 9.6 são definidos como segue:

d – distância entre as linhas de retenção da Rua A, junto às Aproximações 1 e 2;

M_{dir} – movimento direto da Rua A, que vai da Aproximação 1 para 2;

M_{con} – movimento de conversão, que vem da Rua B para a Aproximação 2;

v – velocidade dos veículos do movimento Mdir;

1 – primeiro veículo de Mdir a sair da interseção a montante;

k – último veículo de Mdir que sai da interseção a montante e ainda consegue passar no verde da interseção a jusante;

n – último veículo de Mdir a sair da interseção a montante;

$defa_{ideal}$ – defasagem entre as duas interseções sucessivas, tomando como referência o início dos respectivos verdes para o movimento Mdir;

t_p - tempo de percurso dos veículos do movimento Mdir entre as linhas de retenção das duas interseções, igual ao quociente d/v;

t_d - tempo que leva para desfazer a fila presente no início do verde na Aproximação 2;

t_z – tempo de vermelho mais o tempo de amarelo, durante o qual ocorre chegada de veículos do Mdir na Aproximação 2 [s].

Por meio da Figura 9.6 verifica-se que, após o encerramento do verde para a Rua A na interseção a jusante (Aproximação 2), vão se acumulando três grupos de veículos na correspondente linha de retenção.

O primeiro grupo corresponde aos veículos de M_{dir} que chegaram na interseção a jusante após o término do tempo de verde. Correspondem, no gráfico, ao grupo de veículos entre k+1 e n que chegou durante o intervalo tz.

Essa situação ocorre quando o tempo de verde da Aproximação 2 é menor do que o corresponde na Aproximação 1. Nesse caso, denomina-se NV_{sobra}o número de veículos desse grupo e seu valor é determinado pela Equação 9.2.

$$NV_{sobra} = \frac{F_{dir}}{3600} \times t_z \qquad (9.2)$$

em que,

F_{dir} = taxa de fluxo do movimento M_{dir}[veic/h]; a definição do valor dessa taxa de fluxo **deve** levar em conta se os veículos estão ou não em regime de saturação (ver exemplo de cálculo);

t_z = intervalo de tempo, durante o amarelo e o vermelho, em que veículos de M_{dir} chegaram a interseção a jusante [s]; a duração desse intervalo é obtida pela Equação 9.3.

$$t_z = (t_{vd,1} - t_{vd,2}) + t_p - defa_{ideal} \qquad (9.3)$$

em que,

$t_{vd,\,1}$ = tempo de verde real da Aproximação 1 [s];

$t_{vd,\,2}$ = tempo de verde real da Aproximação 2 [s];

t_p = tempo de percurso [s];

$defa_{ideal}$ – tempo decorrido entre o início do intervalo de verde na Aproximação 1 o início do intervalo de verde na Aproximação 2 (defasagem) [s];

Combinando as equações 9.2 e 9.3, o valor de NV_{sobra} passa a ser obtido pela Equação 9.4.

$$NV_{sobra} = \frac{F_{dir}}{3600} \times [(t_{vd,1} - t_{vd,2}) + t_p - defa_{ideal}] \qquad (9.4)$$

Se o tempo de verde da Aproximação 2 for maior do que o tempo de verde da Aproximação 1, $NV_{sobra} = 0$.

O segundo grupo é formado pelos veículos provenientes da conversão da Rua B para a Rua A, assumindo que a defasagem é tal que obrigue todo esse grupo a parar junto à Aproximação 2. O número de veículos que integra esse segundo grupo é determinado pela Equação 9.5. Ele representa o número de veículo que chega em cada ciclo e que é atendido durante o tempo de verde.

$$NV_{con} = \frac{F_{con} \times t_c}{3600} \quad (9.5)$$

em que,

F_{con} = taxa de fluxo do movimento M_{con} [veic/h];

t_c = tempo de ciclo [s] .

O terceiro e último grupo é formado pelos veículos que se incorporam aos movimentos M_{dir} e M_{con} vindos de vias intermediárias ou edificações lindeiras. Designa-se por NV_{interm} o número desses veículos que ficam retidos no vermelho da Aproximação 2.

Designa-se por t_d o tempo necessário para escoar a fila formada por esses três grupos, tempo esse que é calculado através da Equação 9.6.

$$t_d = t_{pin} + \frac{NV_{sobra} + NV_{con} + NV_{interm}}{\left(\frac{FS_2}{3600}\right)} \quad (9.6)$$

em que,

NV_{sobra} = número de veículos de M_{dir} que chega na interseção a jusante durante o tempo t_z[veic];

NV_{con} = número de veículos de M_{con} que chega na interseção a jusante durante o tempo t_z[veic];

NV_{interm} = número de veículos de vias intermediárias ou áreas lindeiras que chega na interseção a jusante durante o tempo t_z[veic];

t_{pin} = tempo perdido inicial dos veículos que saem no início do verde da Aproximação 2;

FS_2 = Fluxo de saturação da Aproximação 2 [veic/h].

A determinação da defasagem ideal ($defa_{ideal}$) é feita por meio da relação apresentada na Equação 9.7.

$$defa_{ideal} = t_p - t_d \quad (9.7)$$

Teoricamente, se a defasagem entre as Aproximações 1 e 2 for igual a $defa_{ideal}$, o pelotão formado pelos veículos v_1 a v_k vai passar pela Aproximação 2 sem precisar parar. Denomina-se largura da banda ao tempo de verde utilizado por esse pelotão (ver Figura 9.6).

A consideração do "t_{pin}" no cálculo da defasagem da segunda interseção da rede com relação à primeira provoca um deslocamento geral do tempo de defasagem, que automaticamente representará os tempos perdidos nas demais interseções da rede coordenada.

Para o cálculo da defasagem da segunda interseção coordenada da rede, portanto, **deve** ser incluído o efeito do tempo perdido inicial para o deslocamento de NV_{sobra}. Não havendo levantamento in loco do valor de t_{pi}, pode-se adotá-lo como igual a 2 segundos. Para o cálculo da defasagem das demais interseções o tempo perdido inicial **não deverá** ser considerado.

No caso da segunda interseção coordenada, quando o tempo de verde da Aproximação 2 for inferior ao tempo de verde da Aproximação 1, para aplicações práticas sugere-se a utilização da Equação 9.8, desenvolvida a partir das Equações 9.6 e 9.7.

$$defa_{ideal} = \frac{(FS_2 - F_{dir})t_p - FS_2 t_{pin} - F_{dir}(t_{vd,1} - t_{vd,2}) - F_{con}t_c - 3600NV_{inter}}{(FS_2 - F_{dir})} \quad (9.8)$$

Analogamente, quando o verde da Aproximação 2 for superior ao verde da Aproximação 1, sugere-se a utilização da Equação 9.9.

$$defa_{ideal} = t_p - \left[t_{pin} + \frac{(F_{con} \times t_c) + 3600NV_{interm}}{FS_2}\right] \quad (9.9)$$

em que todos os termos já foram definidos anteriormente.

Para as demais interseções coordenadas:

- ✓ no caso do tempo de verde da Aproximação 2 ser inferior ao tempo de verde da Aproximação 1, sugere-se a utilização da Equação 9.10, desenvolvida a partir das Equações 9.6 (sem a inclusão do tpi) e 9.7;

- ✓ quando o tempo de verde da Aproximação 2 for superior ao da Aproximação 1, a Equação 9.11 **deve** ser utilizada.

$$defa_{ideal} = \frac{(FS_2 - F_{dir})t_p - F_{dir}(t_{vd,1} - t_{vd,2}) - F_{con}t_c - 3600NV_{inter}}{(FS_2 - F_{dir})} \quad (9.10)$$

$$defa_{ideal} = t_p - \frac{(F_{con} \times t_c) + 3600NV_{interm}}{FS_2} \quad (9.11)$$

em que todos os termos já foram definidos anteriormente.

A formulação aqui apresentada é prejudicada pelos elementos citados no início deste item, em particular pela não-uniformidade dos fluxos. Esta uniformidade é assumida na determinação de NV_{sobra}e NV_{con}.

9.3.3.3 Alternativas para definição do valor da defasagem para vias de mão dupla

As dificuldades mencionadas para obter a progressão perfeita em via de mão única crescem no caso da coordenação da sinalização semafórica para vias com duplo sentido de circulação (mão dupla). Em geral, a defasagem ideal para um dos sentidos não atende satisfatoriamente o sentido oposto.

Para se determinar defasagens satisfatórias para os dois sentidos de circulação, com bandas de larguras iguais, pode ser adotada uma das seguintes alternativas, considerando pares de interseções sucessivas da rede:

a) ocorrência simultânea dos instantes centrais do tempo de verde das duas interseções sucessivas (ver Figura 9.7), mediante a utilização da Equação 9.12. Os termos “montante” e “jusante” referem-se a um dos sentidos da via, adotado como referência para a definição das defasagens. Essa estratégia é adequada para o caso de interseções próximas entre si.

$$defa_{jusante} = \frac{Verde_{montante} - Verde_{jusante}}{2} \quad (9.12)$$

em que,

$defa_{jusante}$ = defasagem entre o início do tempo de verde da interseção a jusante com relação à interseção a montante, no sentido adotado como referência [s];

$Verde_{montante}$ = duração do tempo de verde real da interseção a montante, no sentido da análise [s];

$Verde_{jusante}$ = duração do tempo de verde real da interseção a jusante, no sentido da análise [s].

Quando os tempos de verde forem iguais entre si, a defasagem é igual a zero nos dois sentidos, ou seja, os tempos de verde das duas interseções iniciam e terminam ao mesmo tempo.

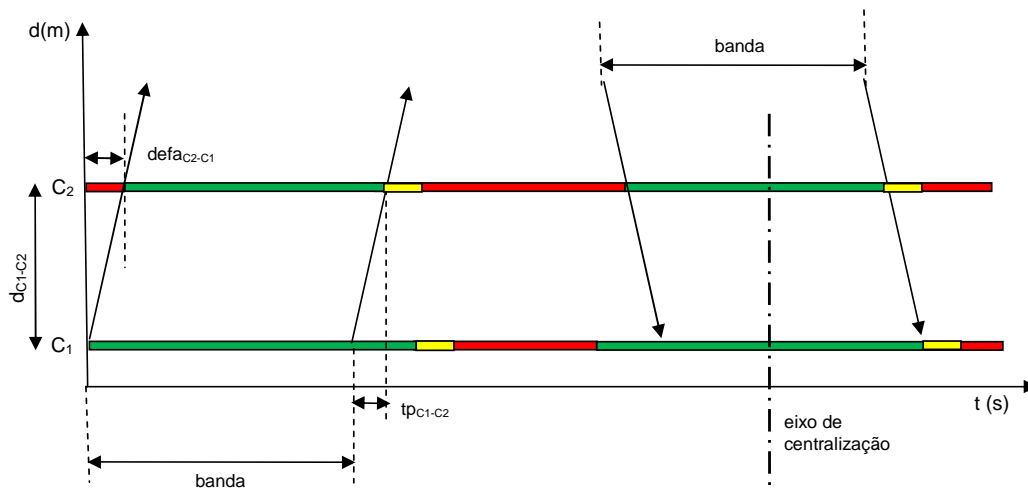



Figura 9.7: Exemplo de coordenação em via de mão dupla com verdes centralizados

b) ocorrência simultânea dos instantes centrais do tempo resultante da soma do tempo de vermelho com o tempo de amarelo da interseção a montante com o tempo de verde da interseção a jusante (ou vice-versa), mediante a utilização da Equação 9.13. Os termos “montante” e “jusante” referem-se a um dos sentidos da via, adotado como referência para a definição das defasagens. Essa estratégia é ilustrada na Figura 9.8.

$$defa_{jusante} = t_c - \left(\frac{t_{z_{montante}} + Verde_{jusante}}{2}\right) \quad (9.13)$$

em que:

$defa_{jusante}$ = defasagem entre o início do tempo de verde da interseção a jusante com relação à interseção a montante, no sentido adotado como referência [s];

t_c = duração do tempo de ciclo [s];

$t_{z_{montante}}$ = duração do tempo de vermelho da interseção a montante acrescido do tempo de amarelo, no sentido adotado como referência [s];

$Verde_{jusante}$ = duração do tempo de verde real da interseção a jusante, no sentido adotado como referência [s].

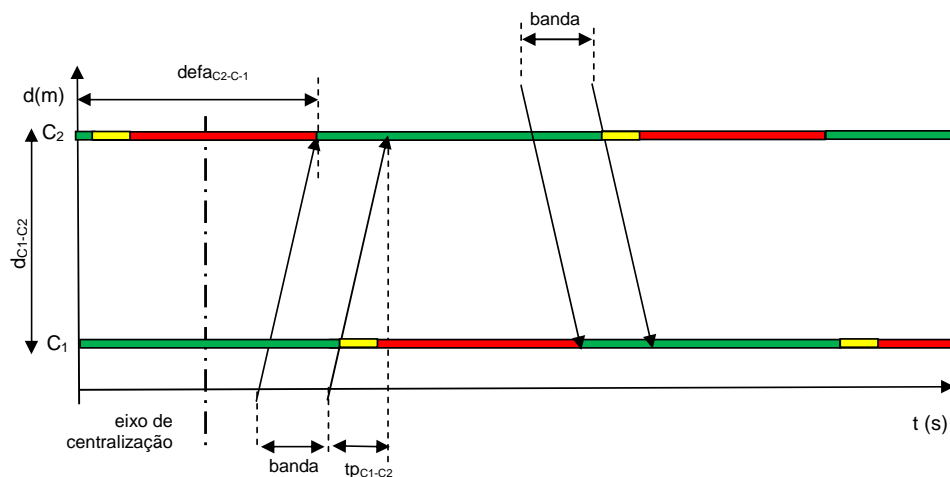



Figura 9.8: Exemplo de coordenação em via de mão dupla com verde e vermelho centralizados

Nos casos em que a rede é formada por mais de um par de interseções sucessivas, é necessário testar as estratégias apresentadas para cada par analisado. O conjunto final das defasagens da rede **deve** ser definido de forma a maximizar a largura da banda total para o conjunto das interseções (ver exemplo da Figura 9.9).

A largura da banda obtida pode ser verificada por meio do diagrama espaço-tempo que represente as defasagens calculadas.

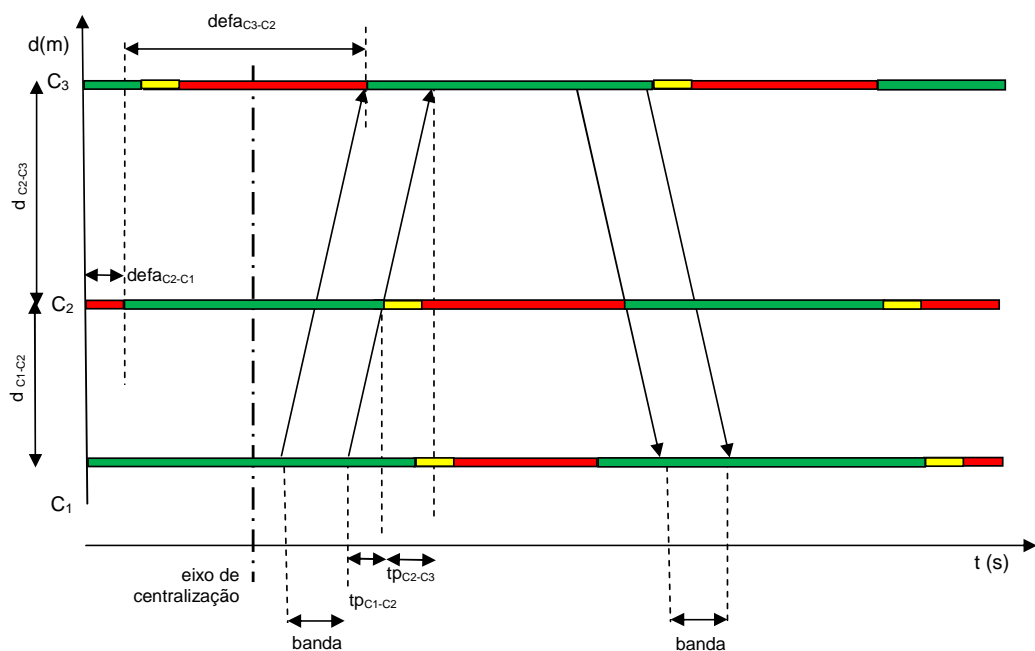



Figura 9.9: Exemplo de coordenação em via de mão dupla com combinação de estratégias

Para as situações em que a importância da progressão difere entre os sentidos de circulação, as estratégias de progressão anteriormente apresentadas não se aplicam, uma vez que definem bandas de igual largura para os dois sentidos. Esse também é o caso quando os tempos de verde de uma mesma interseção diferem para os dois sentidos de circulação. Nessas situações, é mais adequada a determinação dos valores de defasagem com o suporte de programas computacionais.

9.3.3.4 Defasagens em sistemas de controle em área

A determinação das defasagens para redes fechadas (sistemas de controle em área) sem o auxílio de programas computacionais implicará em uma coordenação não otimizada das sinalizações semafóricas da rede fechada.

9.3.3.5 Defasagem com travessia de pedestres

Em redes de tempo fixo, travessias de pedestres afastadas das interseções e controladas por sinalização semafórica, com ou sem botoeira, **devem** ser coordenadas com as demais sinalizações semafóricas integrantes da mesma rede.

Essa coordenação, por meio da determinação de defasagens adequadas, é importante sobretudo para a segurança do pedestre.

Sempre que possível, as defasagens **devem** ser determinadas de modo a evitar que:

i) o condutor que se aproxima ou que está parado na travessia veja, simultaneamente, indicação vermelha na sinalização semafórica da travessia e verde na sinalização semafórica da interseção a jusante da travessia, a fim de evitar que se sinta inclinado a desrespeitar a sinalização semafórica da travessia;

ii) a indicação vermelha da sinalização semafórica da travessia inicie antes da passagem completa do pelotão do movimento coordenado proveniente da sinalização semafórica a montante.

A determinação das defasagens pode ser feita de acordo com um dos métodos anteriormente apresentados ou com o auxílio de programas computacionais específicos, dependendo da complexidade da rede considerada.

9.3.3.6 Largura da banda e eficiência da progressão

Conforme ilustrado nas Figuras 9.4 e 9.5, o tempo disponibilizado pela coordenação semafórica para o deslocamento do pelotão de veículos entre interseções sucessivas sem sofrer parada, é denominado largura da banda.

A eficiência da progressão obtida com a definição das defasagens em sistemas de controle por corredor (mão única ou mão dupla) é determinada para cada sentido de circulação por meio da Equação 9.14. Essa eficiência representa somente um valor de referência da eficiência real, uma vez que não considera a presença de filas internas na rede.

$$EP = \frac{LB}{t_c} \times 100 \qquad (9.14)$$

em que:

EP = eficiência da progressão [%];

LB = largura da banda no sentido considerado [s];

t_c= tempo de ciclo da rede [s].

Em geral, eficiências de progressão entre 40% e 55% são consideradas boas. É importante lembrar que a largura da banda em cada sentido é limitada pelo tempo mínimo de verde disponível para o pelotão nas interseções da rede no sentido considerado.

Para vias de mão dupla, esse tempo mínimo de verde, juntamente com limitações impostas pela coordenação nos dois sentidos, pode resultar em bandas cuja largura máxima possível não atenda aos valores indicados para uma boa progressão.

9.4 Coordenação de sinalizações semafóricas operando em modo atuado

9.4.1 Redes com sinalização semafórica atuada pelo tráfego

É possível formar redes (abertas ou fechadas) integradas por interseções controladas por sinalização semafórica atuada pelo tráfego. Estas podem conter um ou mais estágios demandados com tempos de verde variáveis, acompanhando a variação temporal do fluxo de tráfego. Essa coordenação é complexa e somente pode ser realizada pelos sistemas computacionais responsáveis pelo controle do tráfego da rede.

9.4.2 Redes de tempo fixo com presença de sinalização semafórica semiatuada

Interseções com controle semiatuado, com estágios veiculares dependentes de demanda, podem integrar uma rede de sinalizações semafóricas de tempo fixo coordenadas (aberta ou fechada), desde que os tempos de verde desses estágios não sejam variáveis.

A determinação das respectivas defasagens pode ser feita de acordo com um dos métodos anteriormente apresentados ou com o auxílio de programas computacionais específicos, dependendo da complexidade da rede considerada.

9.5 Programação em situações de congestionamento

O congestionamento nas redes semaforizadas é caracterizado pelo excesso de demanda em relação à capacidade das aproximações de suas interseções.

Nas redes congestionadas pode ocorrer formação de filas com comprimento que ultrapassa a extensão do trecho devia entre as interseções semaforizadas. Áreas congestionadas apresentam uma dinâmica operacional diferente das condições não-congestionadas e, portanto, requerem medidas de controle específicas.

Nas situações de redes congestionadas **deve** ser buscada a maximização da capacidade das aproximações das interseções críticas. Dentre as medidas que podem ser adotadas para este fim, destaca-se:

- ✓ definição de programação semafórica que evite o bloqueio de interseções, mediante o controle da extensão máxima das filas, sobretudo quando esse bloqueio possa comprometer a operação de vias relevantes do sistema viário da cidade, pertencentes ou não à rede considerada;

- ✓ adoção de medidas para aumentar o fluxo de saturação das aproximações, tais como: eliminação de alguns movimentos de conversão; proibição de estacionamento junto às interseções; implantação de faixa reversível; alteração de geometria; realocação de paradas de ônibus, etc.

Outra técnica de controle consiste no gerenciamento da demanda da rede por meio da redução do volume de veículos que acessam sua área crítica. Essa técnica é conhecida como *gating*, em que as filas que poderiam congestionar a área crítica da rede são distribuídas para um ou mais trechos a montante, por meio de programação semafórica adequada.

9.6 Exemplos para tempos fixos

9.6.1 Exemplo para escolha da melhor configuração da rede

O exemplo a seguir ilustra o procedimento para a escolha da melhor configuração de redes semafóricas usando o recurso de um programa computacional para calcular os tempos semafóricos e simular a operação do tráfego na rede. Foi usado o software SIRI, desenvolvido e utilizado pela CET/SP para o dimensionamento sinalização semafórica operando em tempo fixo e para avaliar o desempenho da operação do tráfego sob um dado plano semafórico (para interseções isoladas ou operando em rede).

Para efeito da escolha foram consideradas as medidas de desempenho atraso e número de paradas, bem como o ID, determinado de acordo com a Equação 9.1, admitindo-se que o técnico estabeleceu kp = 20s.

A Figura 9.10 mostra um segmento viário formado por três interseções semaforizadas vizinhas de uma mesma avenida, C1, C2 e C3, operando em tempo fixo. Na Figura 9.11 são representados esquematicamente os grupos de movimento que chegam nesses cruzamentos. Os GMs ímpares pertencem à avenida e os pares representam as três transversais.

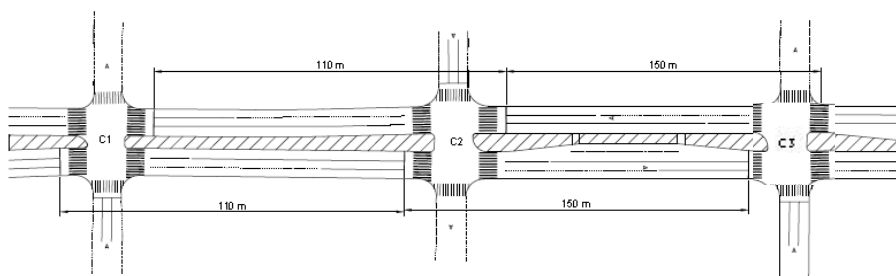



Figura 9.10: Exemplo de uma rede formada por três interseções

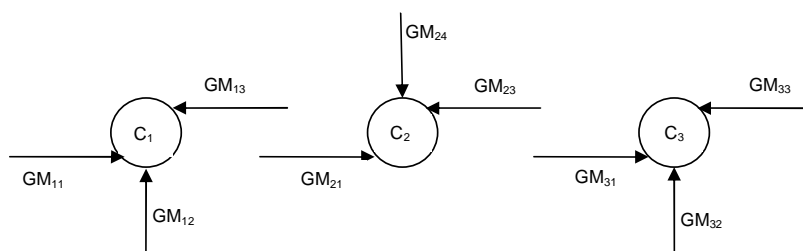



Figura 9.11: Representação esquemática dos grupos de movimentos

Cada um dos três cruzamentos apresenta somente um estágio que atende a avenida e um estágio para a transversal. A Tabela 9.1 descreve as características físicas e de trânsito de cada grupo de movimento e a Tabela 9.2 mostra as taxas de fluxo de contribuição entre os grupos.

O cálculo do tempo de percurso (tp) foi realizado admitindo-se a velocidade de percurso igual a 50km/h.

Tabela 9.1: Dados associados a cada grupo de movimento

GM	F (veic/h)	FS (veic/h)	t_p(s)	COMPRIMENTO (m)	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO (veículos)
11	2770	5400	-	-	-
12	810	3600	-	-	-
13	2260	5400	8	110	70
21	2680	5400	8	110	70
23	1900	5400	11	150	95
24	1930	4730	-	-	-
31	2560	5400	11	150	95
32	1110	3500	-	-	-
33	2300	5400	-	-	-

Tabela 9.2: Taxas de fluxo de contribuição entre os grupos de movimento

ORIGEM – GM	DESTINO 1		DESTINO 2	
	GM	**Taxa de fluxo (veic/h)**	**GM**	**Taxa de fluxo (veic/h)**
11	21	2220	-	-
12	21	460	-	-
13	-	-	-	-
21	31	2150	-	-
23	13	740	-	-
24	13	1520	31	410
31	-	-	-	-
32	23	180	-	-
33	23	1720	-	-

Foram analisados, através de simulação com o programa SIRI, os quatro cenários possíveis para o controle das três interseções. São eles:

i) Cenário I: consiste em todos os cruzamentos isolados;

ii) Cenário II: considera C1 isolado e C2 em rede com C3;

iii) Cenário III: presume C1 em rede com C2 enquanto que C3 permanece isolado;

iv) Cenário IV: os três cruzamentos formam uma única rede.

A Tabela 9.3 apresenta os principais resultados obtidos, em termos de tempos de ciclo dos cruzamentos e atrasos/número de paradas para os grupos de movimento.

Tabela 9.3: Resultados globais fornecidos pelo SIRI para os cenários estudados

CENÁRIO	TEMPO DE CICLO (s)			ATRASO (veic*h/h)	NÚMERO DE PARADAS (veic/h)	ID (veic*h/h)
	C1	C2	C3			
I	70	120	110	112,1	15088	195,9
II	70	120	120	96,8	12494	166,2
III	120	120	110	119,4	14214	198,4
IV	120	120	120	103,9	11404	167,3

A análise da Tabela 9.3 mostra que a seleção do melhor cenário depende diretamente da medida de desempenho selecionada, que reflete o propósito da coordenação semafórica estudada. Por exemplo, se o objetivo maior da coordenação for reduzir o atraso total do conjunto de interseções, a melhor solução é obtida com o Cenário II. Contudo, se o objetivo for minimizar o número de paradas, o Cenário IV é o mais indicado.

No caso do técnico decidir usar o ID, que é uma medida tradicionalmente adotada, conclui-se que o cenário mais adequado é o II, no qual o cruzamento C1 permanece isolado, enquanto que os cruzamentos C2 e C3 passam a operar em rede.

9.6.2 Exemplo da programação semafórica para um sistema de controle em corredor

a) Via de sentido único

Para efeito deste exemplo, foi considerado que a via apresentada na Figura 9.10 é de mão-única, no sentido de C1 para C3, e que os três cruzamentos formam uma única rede. Adotando-se os dados de taxa de fluxo e fluxo de saturação apresentados para os movimentos da via principal (GM11, GM21 e GM31), os movimentos das vias secundárias (GM12, GM24 e GM32), tempo de ciclo igual a 120 segundos e tempo de entreverdes para cada estágio igual a 5s (3s de amarelo e 2s de vermelho geral), tem-se os dados da Tabela 9.4.

Tabela 9.4: Dados para o exemplo de via de mão-única

INTERSEÇÃO	GM	TAXA DE FLUXO (veic/h)				FS (veic/h)	t_{vd} (s)	t_p (s)
		F_{dir}	F_{con}	F_{interm}	Total			
C1	11	2220	NC	0	2770	5400	76	
	12	NC	460	0	810	3600	34	

C2	21	2150	NC	0	2680	5400	60	8
	24	NC	410	0	1930	4730	50	
C3	31	NC	NC	0	2560	5400	66	11
	32	NC	NC	0	1110	3500	44	
NC – fluxos existentes que não serão utilizados no cálculo das defasagens.								

O cálculo da defasagem entre C1 e C2, visando a coordenação da via principal pode ser feito pela Equação 9.8, uma vez que $t_{vd,2}$ (referente a C2) é menor que $t_{vd,1}$ (referente a C1). Já para a defasagem entre C2 e C3, **deve** ser utilizada a Equação 9.11, tendo em vista que $t_{vd,2}$ (referente a C3) é maior que $t_{vd,1}$ (referente a C2).

Assim, a defasagem ideal entre C1 e C2 é igual a:

$$defa_{ideal} = \frac{(5400-2220)8 - 5400\times 2 - 2220(76-60) - 460\times 120 - 3600\times 0}{(5400-2220)} = -23{,}93s$$

Adotar $defa_{ideal} = -24s$

A defasagem entre C2 e C3 é igual a:

$$defa_{ideal} = 11 - \frac{(410\times 120) + 3600\times 0}{5400} = 1{,}89s$$

Adotar $defa_{ideal} = 2s$

As defasagens calculadas podem ser observadas na Figura 9.12.

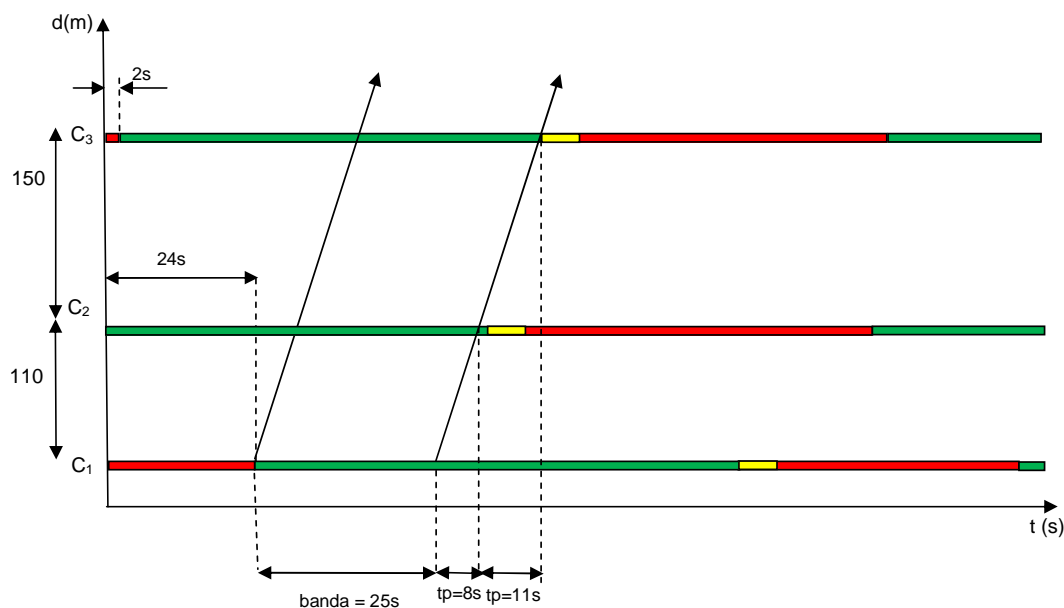



Figura 9.12: Diagrama espaço-tempo do exemplo de via de mão única

b) Via de sentido duplo

Considere a via mostrada na Figura 9.10, admitindo que se deseja calcular as defasagens para a promoção da coordenação semafórica nos dois sentidos. Será adotado tempo de ciclo igual a 120 segundos e tempo de entreverdes de 5 segundos (3s de amarelo e 2s de vermelho geral). Os demais dados utilizados são apresentados na Tabela 9.5.

Tabela 9.5: Dados para o exemplo de via de mão-dupla

INTERSEÇÃO	GM DA VIA PRINCIPAL	t_{vd} (s)	DISTÂNCIA (m)	t_p (s)
C1	11	76		
	13		110	8
C2	21	60	110	8
	23		150	11
C3	31	66	150	11
	33			

b.1) Cálculo da defasagem usando a alternativa de ocorrência simultânea dos instantes centrais do tempo de verde das duas interseções sucessivas, mediante a utilização da Equação 9.12. Esse cálculo é ilustrado na Figura 9.13.

Defasagem de C2, com relação a C1:

$$defa_{jusante} = \frac{76 - 60}{2} = 8s$$

Adotar, $defa_{jusante}$ = 8s

Defasagem de C3, com relação a C2:

$$defa = \frac{60 - 66}{2} = -3s$$

Adotar, $defa_{jusante}$ = - 3s

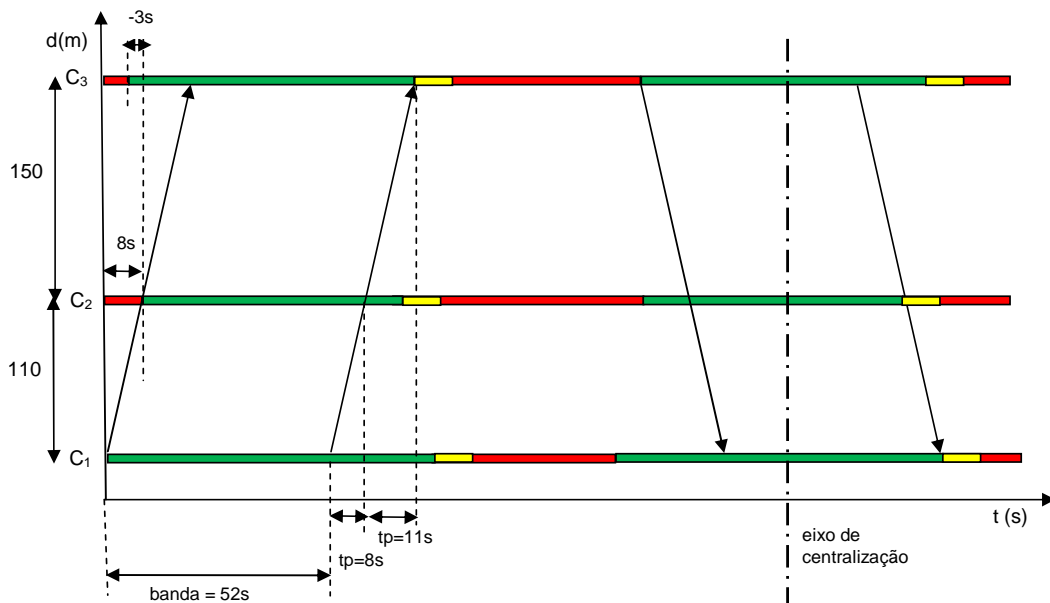



Figura 9.13: Diagrama espaço-tempo do exemplo de via de mão dupla na situação b.1

b.2) combinação de estratégias: ocorrência simultânea dos instantes centrais do tempo de vermelho da interseção a montante com o tempo de verde da interseção a jusante (ou vice-versa), mediante a utilização da Equação 9.13. Esse cálculo foi adotado para a determinação da defasagem entre C2 e C3. A defasagem entre C1 e C2 foi determinada pela Equação 9.12 e é igual a 8s. As defasagens referidas são mostradas na Figura 9.14.

Defasagem de C2, com relação a C1:

$$defa_{jusante} = \frac{76 - 60}{2} = 8s$$

Adotar, defa = 8s

Defasagem de C3, com relação a C2:

$$defa_{jusante} = 120 - \left(\frac{60 + 66}{2}\right) = 57s$$

Adotar, defa = 57s

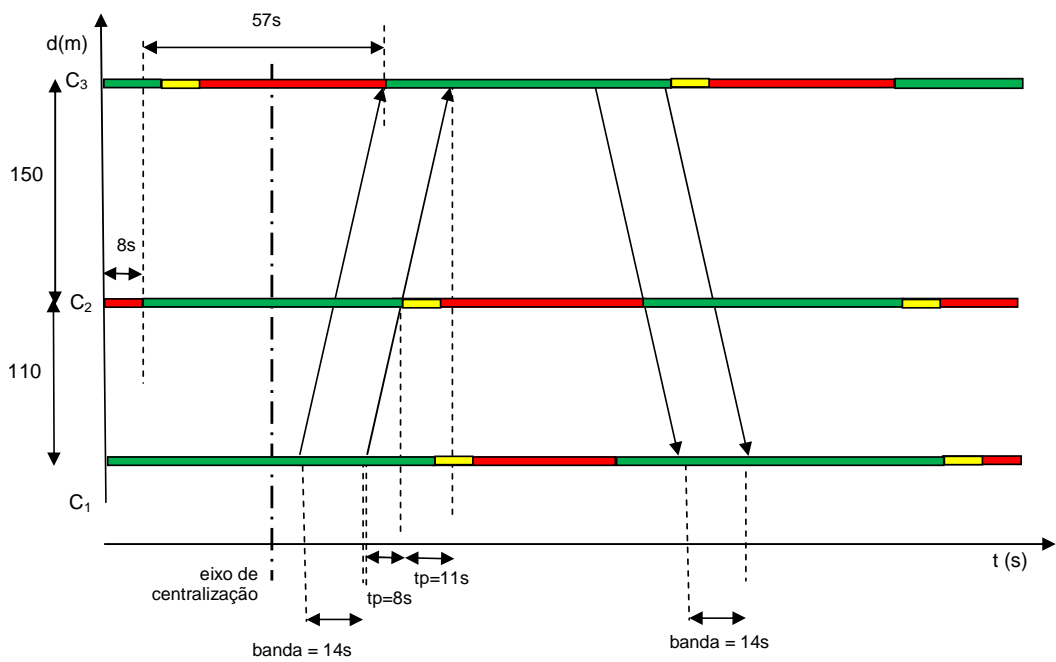



Figura 9.14: Diagrama espaço-tempo do exemplo de via de mão dupla na situação b.2

10 . POSICIONAMENTO DA SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA

Os dispositivos de sinalização semafórica **devem** ser implantados segundo critérios de projeto, de modo que a informação resultante para os condutores de veículos (motorizados e não motorizados) e para os pedestres seja clara e que a visibilidade dos dispositivos luminosos ocorra a distâncias adequadas e seguras para os processos de tomada de decisão. Também **devem** ser consideradas as interferências que os dispositivos podem causar na circulação dos pedestres nas calçadas e nos acessos de veículos a lotes lindeiros.

10.1 Sinalização semafórica veicular

Neste item, a expressão sinalização semafórica veicular refere-se à sinalização semafórica para o controle de veículos motorizados. A questão das sinalizações semafóricas para ciclistas será tratada no item 10.3.

10.1.1 Padronização do posicionamento de semáforos

Existem basicamente dois padrões de posicionamento de semáforos em interseções: antes e depois da via transversal, apresentando cada um deles características operacionais próprias.

Neste manual não se pretende recomendar a adoção de um único padrão nacional, mas sim a opção, pelo município ou região, de um único padrão. É importante que os projetos sejam desenvolvidos sempre com o mesmo padrão para manter a clareza e padronização da sinalização. Em alguns locais pode ser impossível obedecer integralmente ao padrão adotado, seja pela dificuldade de posicionamento dos semáforos no local pretendido ou pela maior conveniência de colocação em local fora do padrão, por motivos de segurança ou de situações críticas de fluidez. O descumprimento do padrão somente deve ocorrer em caráter excepcional.

As Tabelas 10.1 e 10.2 apresentam as principais características de cada um dos padrões de posicionamento em relação ao comportamento de condutores e pedestres e à segurança e fluidez das vias.

Tabela 10.1: Características da posição do semáforo antes da via transversal

TÓPICO	CARACTERÍSTICA
Parada na linha de retenção	Induz o condutor a parar o veículo antes da linha de retenção devido à condição de visualização do semáforo.
Transposição da interseção	Transposição da interseção sem informação da indicação luminosa do semáforo.
Travessia de pedestres	Induz o condutor a parar o veículo antes da faixa de travessia de pedestres devido à condição de visualização do semáforo.
Visibilidade do semáforo	Reduz os riscos de saída antecipada dos veículos devido à dificuldade de visualização do semáforo da via transversal.
Quantidade de material	Necessidade de implantar semáforos adicionais para que os condutores possam visualizar os focos a curta distância. Em determinadas situações a implantação de semáforos para pedestres é necessária devido à dificuldade que os pedestres têm para visualizar a indicação dos veículos.
Caixa de acumulação de veículos	Caixas de acumulação pequenas podem não comportar a quantidade de veículos armazenados, devido ao fato de ser necessário manter distância mínima de visibilidade entre a linha de focos e a retenção.
Interferências	A visualização clara da linha de focos em coluna simples pode ser prejudicada pelas interferências laterais, tais como postes de energia elétrica e árvores.

Tabela 10.2: Características da posição do semáforo depois da via transversal

TÓPICO	CARACTERÍSTICA
Parada na linha de retenção	Devido à facilidade de visualização dos grupos focais posicionados após a interseção, pode haver desrespeito à faixa de retenção e consequentes invasões da faixa de pedestres pelos veículos.
Transposição da interseção	Transposição da interseção com informação da indicação luminosa do semáforo.
Travessia de pedestres	Os pedestres, mesmo sem grupos focais específicos, geralmente conseguem visualizar a operação da sinalização semafórica por meio dos grupos veiculares, e compreender quando as correntes de tráfego são interrompidas para que eles possam realizar as travessias.
Visibilidade do semáforo	Pode haver saída antecipada dos veículos devido à possibilidade de visualização do semáforo da via transversal.
Quantidade de material	Geralmente não é necessário implantar semáforos veiculares adicionais para a visibilidade dos focos a curta distância.
Caixa de acumulação de veículos	A caixa de acumulação pode iniciar no limite da área de conflito da interseção, maximizando a quantidade de veículos acumulados.
Interferências	A visualização clara da linha de focos em coluna simples é menos prejudicada pelas interferências laterais, tais como postes de energia elétrica e árvores.

Em qualquer dos padrões de posicionamento de semáforos, é necessário que as interferências visuais sejam observadas. A verificação em campo é fundamental, pois só assim é possível avaliar a visibilidade dos semáforos sob o ponto de vista do pedestre e do condutor.

Da mesma forma, é necessário verificar periodicamente as condições de visibilidade dos semáforos, que podem ser obstruídos por interferências visuais tais como galhos de árvores, painéis publicitários, alinhamento dos postes de energia elétrica e, até mesmo, sinalização de trânsito implantada posteriormente ao semáforo. Essa verificação **deve** ser realizada em diferentes períodos do dia e em diferentes condições de luminosidade ambiente.

10.1.2 Visibilidade dos semáforos (grupos focais)

Os semáforos (grupos focais) de uma aproximação **devem** ser visíveis ao condutor de veículos motorizados sob duas condições:

- ✓ quando o veículo está em movimento de aproximação de local semaforizado **-** “visibilidade à distância”;
- ✓ quando o veículo está parado na linha de retenção **-** “visibilidade a partir da linha de retenção”.

a) Visibilidade à distância: A visibilidade do semáforo, seja em suporte projetado sobre a via ou em coluna simples, para o condutor de veículo em movimento de aproximação, **deve** considerar o campo visual do condutor (Figura 10.1) e a sua velocidade de aproximação.

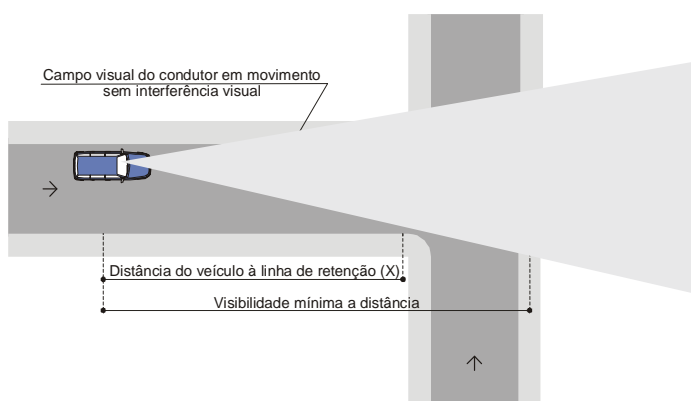



Figura 10.1: Campo visual do condutor em movimento

A visibilidade à distância **deve** garantir o tempo necessário para o condutor perceber, reagir e parar o seu veículo na linha de retenção, de forma segura. A distância percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção, reação e frenagem (“X” na Figura 10.1) é obtida pela Equação 10.1. Esta distância é denominada distância de visibilidade de parada.

$$X = v \times t_{pr} + \frac{v^2}{2(a_{ad} \pm ig)} \quad (10.1)$$

em que: X = distância de visibilidade de parada, em metros;

v= velocidade regulamentada da via, em m/s;

t_{pr} = tempo de percepção e reação, em s;

a_{ad} = desaceleração, em m/s²;

i = inclinação da via na aproximação (m/m), sendo “+” em aclives e “**-**“ em declives;

g = aceleração da gravidade, em m/s^2.

Usualmente, adotam-se os seguintes valores para as grandezas envolvidas:

t_{pr} = 1,0 s;

a_{ad} = 3,0 m/s^2;

g = 9,8 m/s^2.

A Tabela 10.3 fornece os valores da distância de visibilidade de parada em função da velocidade e dos valores usualmente adotados para t_{pr} e a_{ad}.

Tabela 10.3: Distância de Visibilidade de Parada no Semáforo em Função da Velocidade

VELOCIDADE (km/h)	DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE DE PARADA(m)
30	20
40	32
50	46
60	63
70	82
80	105

Os valores de a_{ad} e t_{pr} adotados para o cálculo das distâncias da Tabela 10.3 são para as seguintes condições de projeto: via plana (i = 0), livre de poluição visual e pavimento com boa aderência.

b) Visibilidade a partir da linha de retenção: A visibilidade do grupo focal pelo condutor do veículo parado na linha de retenção depende do atendimento às condições apresentadas em b.1 e b.2.

b.1. A distância do grupo focal à linha de retenção (D), projetada no plano horizontal, **deve** ser obtida pela Equação 10.2. Esta equação considera o ângulo vertical de 20 graus, em relação à linha de visada natural do condutor (Figura 10.2).

$$D \geq \frac{H + A - B}{tg\,20^o} - C \qquad (10.2)$$

ou seja: $D \geq \left[\frac{H - 0,25}{0},36\right] - 1,5$

em que:

A = dimensão média da altura do grupo focal, em metros,

B = altura adotada dos olhos do condutor sentado no veículo, em metros,

C = distância adotada entre os olhos do condutor e a frente do veículo, em metros,

D = distância da linha de retenção até o grupo focal, em metros,

H = altura livre do solo à base do grupo focal, em metros e

$tg\ 20^o$ = **0,36**

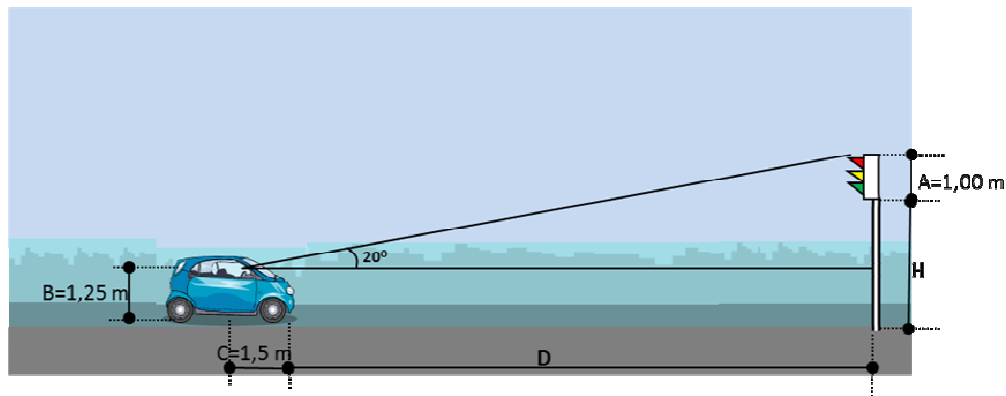



Figura 10.2: Distância do grupo focal à linha de retenção

A Tabela 10.4 fornece as distâncias da linha de retenção aos grupos focais:

- ✓ mínimas, considerando as alturas livres a partir do nível do solo para fixação dos grupos focais veiculares, sendo H=2,40 m quando instalados em coluna simples e H=5,50 m quando instalados em suporte projetado sobre a via (braço projetado, pórtico, cordoalha);

- ✓ máximas, estabelecidas empiricamente para evitar o comprometimento da visibilidade e legibilidade.

Tabela 10.4: Distância da Linha de Retenção ao Grupo Focal

DISTÂNCIA DA LINHA DE RETENÇÃO (D)	**MÍNIMA (m)**	**MÁXIMA (m)**
Semáforo em coluna simples (H=2,40m)	4,50	30,00

Semáforo projetado sobre a via (H=5,50m)	13,00	30,00

No caso das condições locais não permitirem que seja respeitada a distância mínima da linha de retenção ao grupo focal indicada na Tabela 10.4, **deve** ser colocado grupo focal repetidor em altura compatível com a distância disponível.

b.2. O ângulo entre o eixo de cada aproximação e a linha de visada ao grupo focal **deve** ser menor ou igual a 20 graus (ver Figura 10.3). Em condições em que a visibilidade a partir da linha de retenção é garantida por semáforo em coluna simples, admite-se que esse ângulo seja de até 30 graus.

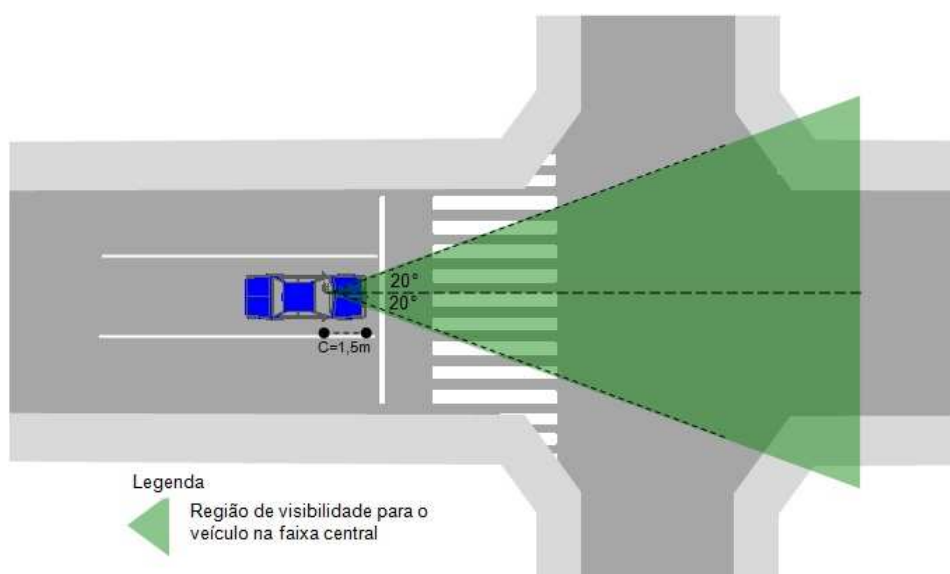



Figura 10.3: Ângulo entre a linha de visada do condutor e o eixo da faixa

10.1.3 Quantidade e posicionamento de grupos focais

Para o condutor parado junto à linha de retenção, **deve** ser garantida em todas as faixas a visibilidade de pelo menos um grupo focal, de acordo com os critérios b.1 e b.2 do item 10.1.2.

A garantia dessa visibilidade pode exigir o uso de mais de um grupo focal, implantado em coluna simples ou em braço projetado, de acordo com as características do local.

Para o condutor de veículo em movimento, é importante assegurar a informação da indicação luminosa vermelha à distância, considerando a possibilidade de queima de uma lâmpada.

Para tanto, uma das seguintes medidas **deve** ser adotada:

- ✓ usar, no mínimo, dois grupos focais por aproximação;

- ✓ implantar, pelo menos, um grupo focal com dois focos vermelhos.

10.1.4 Critérios para o projeto de locação

O projeto de locação **deve** atender:

- ✓ distância de visibilidade de parada em função da velocidade (item 10.1.2.a);
- ✓ distâncias de visibilidade mínimas e máximas dos grupos focais em relação à linha de retenção (item 10.1.2.b);
- ✓ quantidade mínima de grupos focais (item 10.1.3);
- ✓ em vias de mão dupla, sem canteiro central, a sinalização semafórica **deve** ser implantada do lado direito.

Atendidos os critérios anteriormente referidos, **deve-se** procurar reduzir o número de colunas a ser implantadas, considerando que podem ser fixados em uma mesma coluna mais de um grupo focal, veicular ou de pedestres.

10.1.5 Afastamento lateral e altura livre

O afastamento lateral mínimo de todo e qualquer elemento de sinalização semafórica **deve** ser de 0,30 metros do meio fio, conforme indicado na Figura 10.4.

Usualmente as colunas semafóricas são implantadas a uma distância de 0,80 metros do meio-fio.

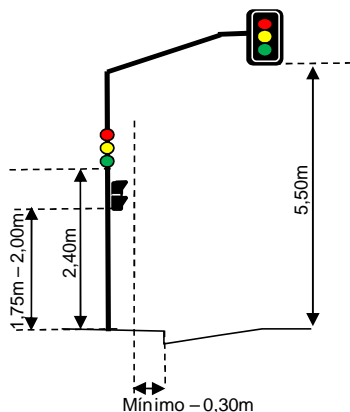



Figura 10.4: Afastamento lateral e altura livre do grupo focal

Nos locais em que não for possível garantir este afastamento com a colocação do grupo focal à frente da coluna, pode-se fixar o grupo lateralmente à coluna, com suportes espaçadores.

A altura livre do anteparo dos grupos focais em projeção sobre a via **deve** ser de 5,50 metros, podendo variar em situações específicas (ver Figura 10.4).

A altura livre dos grupos focais ou anteparos fixados em colunas **deve** ser de 2,40 metros, podendo variar para mais em situações específicas (ver Figura 10.4).

10.1.6 Casos especiais

10.1.6.1 Aproximação em curva vertical e horizontal

Nas aproximações em aclives que se tornam planas junto à interseção com semáforo posicionado após a interseção, e que não atendam às condições de visibilidade mínima à distância (item 10.1.2), **deve** ser verificado se a elevação do grupo focal proporciona a visibilidade necessária. No caso desta solução não atender, **deve** ser instalado um grupo focal antecipado, além daquele utilizado para atender a visibilidade junto à linha de retenção.

No caso da instalação de grupo focal antecipado, esse grupo não pode ser posicionado antes da linha de retenção (ver Figura 10.5).

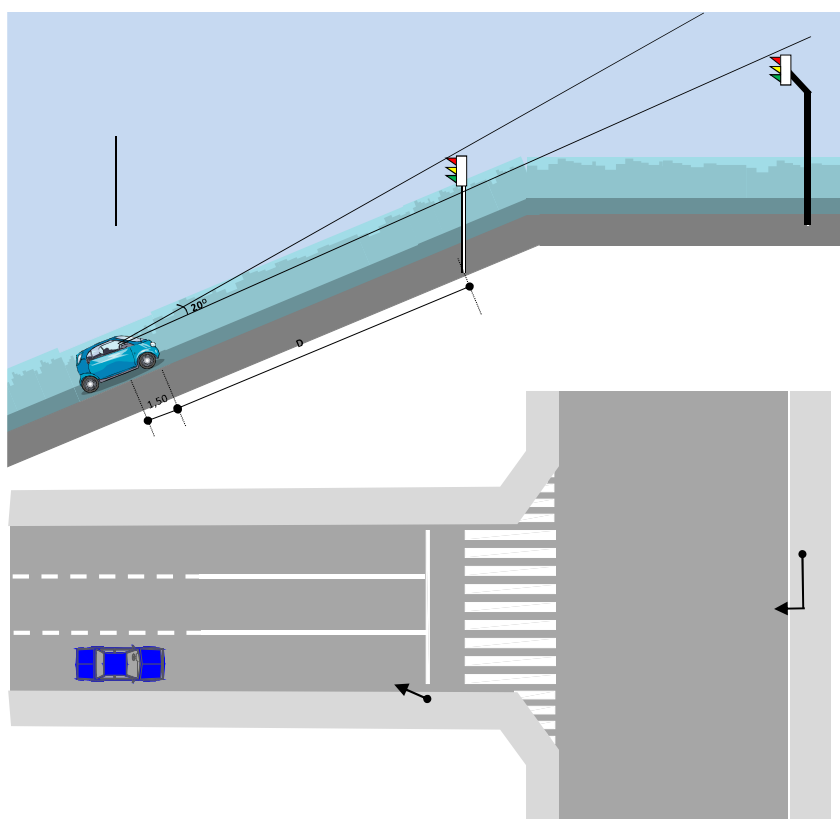



Figura 10.5: Aproximação em curva vertical (posicionamento após a interseção)

Nas aproximações em curva horizontal, em que a distância de visibilidade ao grupo focal for inferior à distância de visibilidade de parada (“X” na Figura 10.1), **deve** ser verificada a necessidade de colocação de grupo focal antecipado, além do utilizado para atender a visibilidade junto à linha de retenção (ver Figura 10.6).

A necessidade de instalar um grupo focal antecipado a fim de garantir a distância de visibilidade de parada em vias de mão dupla sem canteiro central, caso não exista solução alternativa, pode, até mesmo, obrigar que seja instalado grupo focal no lado esquerdo, deixando de atender o item 10.1.4 (ver Figura 10.6).

No caso da instalação de grupo focal antecipado, esse grupo não pode ser posicionado antes da linha de retenção.

Curva à Esquerda

Curva à Direita

Colocar Semáforo Antecipado (A) no lado do cone de visão

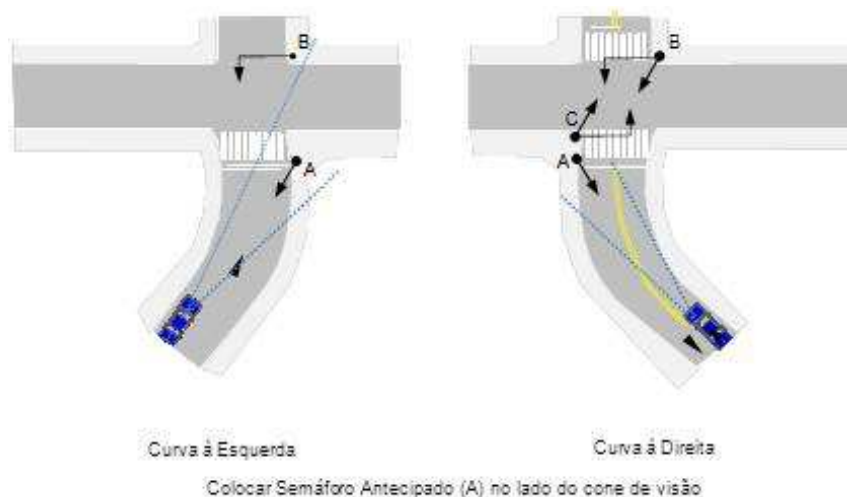



Figura 10.6: Semáforo em curva horizontal de via de mão única (posicionamento após a interseção)

Nos casos de curvas acentuadas, **deve** ser observado o disposto no **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume II – Sinalização Vertical de Advertência** e **Volume IV – Sinalização Horizontal**, a fim de informar que há uma sinalização semafórica adiante**.**

Em casos específicos, a sinalização vertical de advertência pode ser complementada com a sinalização luminosa de advertência para alertar o condutor da existência de semáforo adiante.

10.1.6.2 Caixa de acomodação pequena

Existem situações em que a geometria ou sinalização da via resulta em uma caixa pequena para a acomodação dos veículos. Nessas situações, a linha de retenção **deve** sempre estar posicionada de modo a permitir que a caixa de acomodação comporte pelo menos um veículo de passeio.

Caixas de acomodação pequenas ocorrem frequentemente em interseções de vias com canteiro central.

Quando não for possível acomodar pelo menos um veículo de passeio na abertura do canteiro central, configura-se uma única interseção, **devendo** ser utilizada somente uma linha de retenção para a respectiva sinalização semafórica (Figura 10.7). Neste caso, a programação

semafórica **deverá** prever que a via será atravessada em uma única etapa, o que interfere no cálculo do tempo de entreverdes.

Semáforos Anteriores à Interseção

Semáforos Posteriores à Interseção

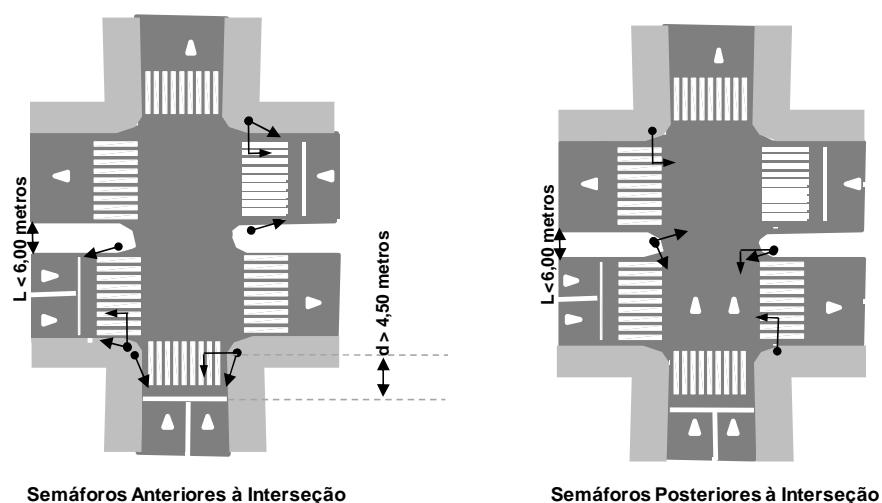



Figura 10.7: Sinalização semafórica com caixa de acomodação insuficiente

Quando for possível acomodar pelo menos um veículo de passeio (em interseção de via com canteiro central largo), **devem** ser implantadas duas linhas de retenção com respectivas sinalizações semafóricas, conforme Figura 10.8. Neste caso, a programação semafórica, tanto no que diz respeito ao tempo de entreverdes (prever ou não que a via seja atravessada em uma única etapa) quanto à defasagem, **deve** levar em conta as características geométricas do local e a composição do tráfego.

Devido à proximidade das sinalizações semafóricas **deve** haver um cuidado especial na disposição dos grupos focais para evitar interpretações incorretas por parte do condutor. Esta preocupação **deve** ser estendida também à programação semafórica.

Semáforos Anteriores à Interseção

Semáforos Posteriores à Interseção

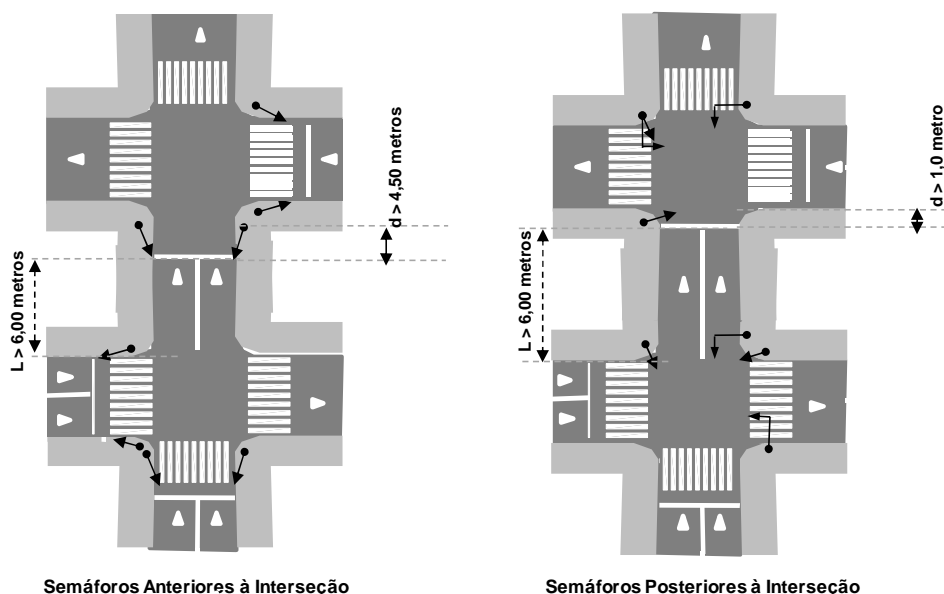



Figura 10.8: Sinalização semafórica com caixa de acomodação suficiente

10.2 Sinalização semafórica de pedestres

10.2.1 Critérios de uso de grupos focais de pedestres

Uma vez definida a implantação de sinalização semafórica em função do estabelecido no Capítulo 4, o uso dos grupos focais de pedestres **deve** atender os critérios a seguir discriminados.

10.2.1.1 Sinalização semafórica em meio de quadra.

Não é permitida a implantação de travessia semaforizada em meio de quadra apenas com grupos focais veiculares, sem grupos focais de pedestres.

10.2.1.2 Sinalização semafórica em interseções.

É obrigatório o uso dos grupos focais de pedestres nas travessias em que for atingido o parâmetro de verificação da necessidade da sinalização semafórica, conforme alínea [e] do item 4.2.1. Este uso é obrigatório, independentemente da decisão de implantação da sinalização semafórica ter sido baseada na abordagem de pedestres ou de veículos.

A decisão da implantação de grupos focais de pedestres em travessias não atendidas pelo exposto acima, **deve** considerar os seguintes fatores:

- ✓ visibilidade para o pedestre da indicação luminosa do grupo focal veicular;
- ✓ extensão da travessia;

- ✓ existência de dispositivos de proteção de pedestres;
- ✓ sinalizações semafóricas operando com mais de dois estágios;
- ✓ locais com demanda específica, como crianças, idosos, pessoas com dificuldade de locomoção.

10.2.1.3 Considerações Gerais.

Em travessias em duas etapas, realizadas em estágios distintos, em vias que possuam canteiro central com largura maior que 1,50 m, recomenda–se a locação das faixas de pedestres de forma desalinhada, para evitar a leitura errônea da indicação luminosa de pedestre em cada pista. Esta medida permite ao pedestre a percepção exata da sua travessia em cada etapa, conforme Figura 10.9.

Neste caso, **deve-se** observar que as faixas sejam sinalizadas de forma que o caminhamento dos pedestres no canteiro central seja efetuado no sentido contrário ao fluxo de veículos da travessia que será realizada. É recomendada a utilização de dispositivos de canalização para o movimento de pedestres (gradis).

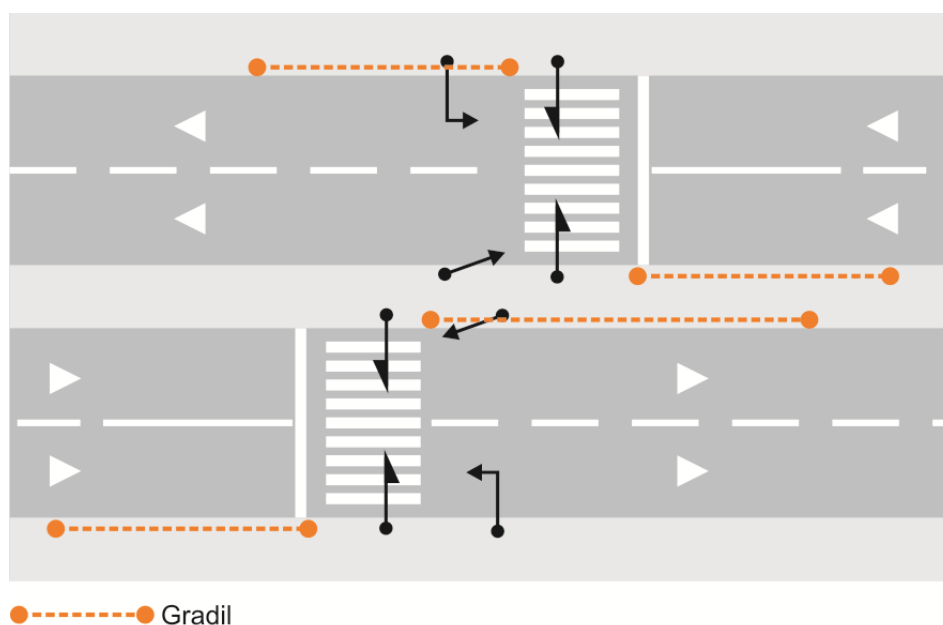



Figura 10.9: Travessias realizadas em estágios distintos

No caso em que a travessia total for composta por duas ou mais faixas de pedestres alinhadas, e existir a obrigatoriedade de colocação de grupos focais para pedestres, estes **devem** ser colocados em todas as faixas que compõem a linha de travessia.

Quando há necessidade de colocação de estágio de pedestre e o canteiro central não apresentar condições para a travessia em etapas, devido a espaço insuficiente, a travessia **deve** ser sinalizada com focos somente nas suas extremidades. Nesta situação, quando o estágio de pedestre for acionado por botoeira, pode ser necessário implantar coluna com botoeira no canteiro central, conforme exemplo mostrado a Figura 10.10.

Botoeira

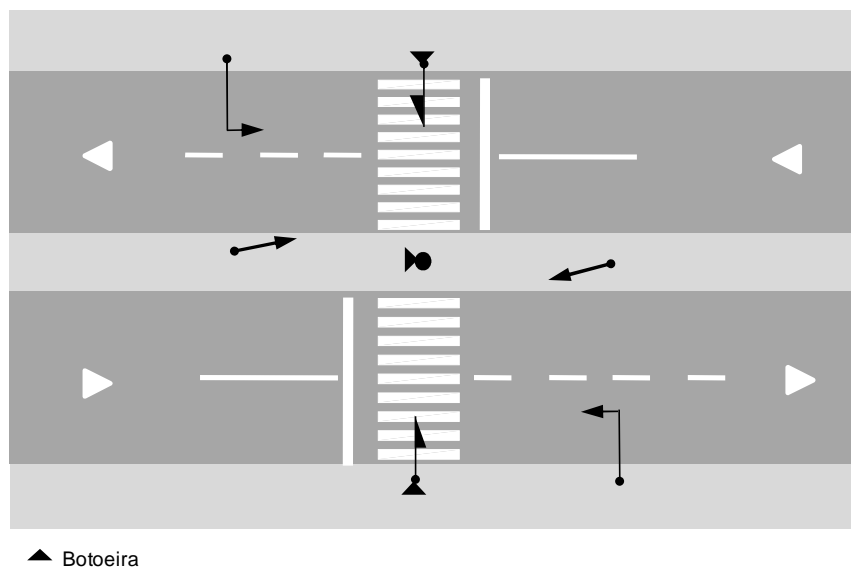



Figura 10.10: Exemplo da travessia em um único estágio

10.2.2 Visibilidade dos semáforos (grupos focais)

A indicação luminosa do grupo focal **deve** ser visível pelos pedestres em toda a área de abrangência da faixa de travessia. Os grupos focais de pedestres **devem** ser posicionados de modo a não sofrer interferências visuais de postes de iluminação, controladores, colunas semafóricas, sinalização vertical, entre outras.

Recomenda-se os seguintes critérios para a definição do número e posicionamento dos grupos focais de pedestres:

a) para faixas com largura igual ou inferior a 8m: um grupo focal em qualquer posição ao longo da largura da faixa;

b) para faixas com largura entre 8 e 12 m: um grupo focal na porção central da faixa ou um grupo focal em cada extremidade da faixa;

c) para faixas com largura superior a 12 m: no mínimo dois grupos focais, distribuídos na largura da faixa de modo a assegurar a visibilidade de todos os pedestres.

A Figura 10.11 apresenta exemplos de diferentes posicionamentos dos grupos focais de pedestres.

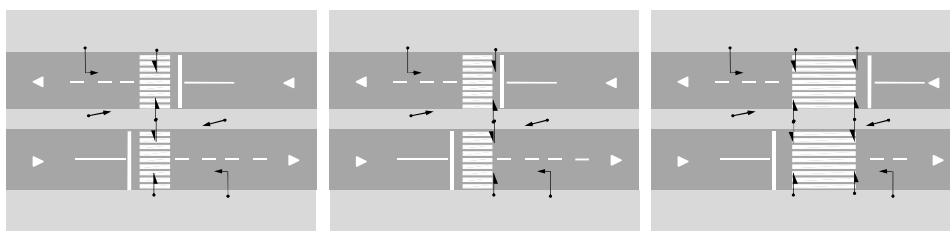



Figura 10.11: Exemplos de posições de grupos focais de pedestres

10.2.3 Critérios para o projeto de locação

A locação de grupos focais para pedestres **deve** seguir os seguintes critérios:

a) instalar pelo menos um grupo focal para cada sentido de movimento dos pedestres, atendendo aos critérios de visibilidade indicados no item 10.2.2;

b) evitar o conflito com as indicações luminosas veiculares;

c) preservar o acesso às guias rebaixadas para pedestres, existentes ou a construir, conforme ilustrado na Figura 10.12;

d) garantir o conforto dos pedestres, interferindo o mínimo possível na sua circulação.

Atendidos os critérios anteriormente referidos, **deve-se** procurar reduzir o número de colunas a ser implantadas, considerando que podem ser fixados em uma mesma coluna mais de um grupo focal, veicular ou de pedestres.

Guia Rebaixada

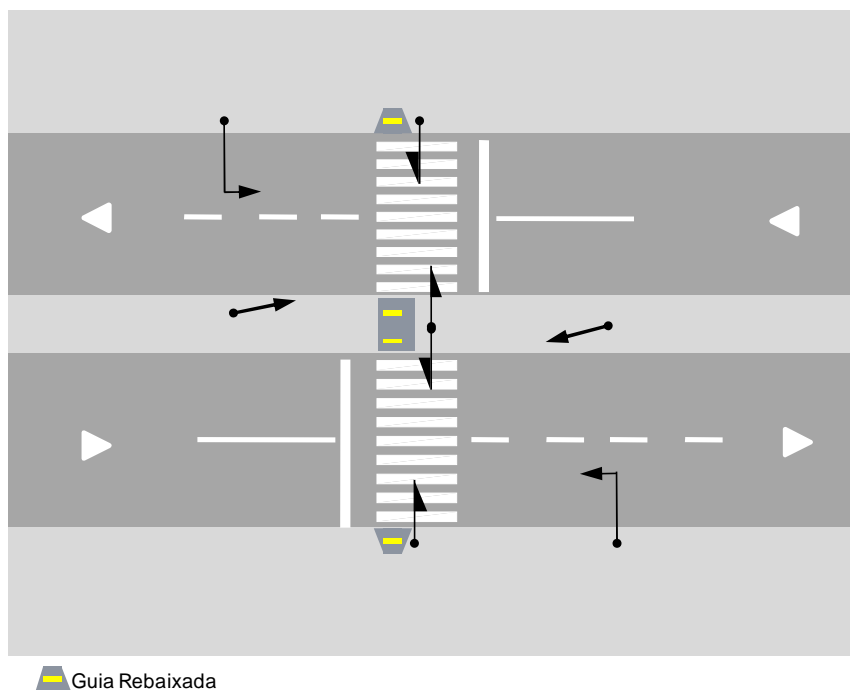



Figura 10.12: Exemplo de locação de grupos focais para pedestres

10.2.4 Afastamento lateral e altura livre

Conforme apresentado no item 10.1.5, o afastamento lateral mínimo de todo e qualquer elemento de sinalização semafórica **deve** ser de 0,30 metros do meio-fio e as colunas semafóricas são usualmente implantadas a uma distância de 0,80 m do meio-fio.

A altura livre dos grupos focais **deve** ser de 1,75 m a 2,0 m, podendo variar para mais em situações específicas (ver Figura 10.4).

10.2.5 Botoeiras de pedestres

Deve-se instalar botoeiras sempre que o estágio de pedestres for demandado em pelo menos um período do dia.

A botoeira **deve** ser posicionada de modo a permitir ao pedestre associar o dispositivo com a travessia correspondente (ver Figura 10.13). A coluna que sustenta a botoeira **deve** estar locada na calçada, respeitando os limites da faixa de pedestres e afastada a uma distância de no máximo 1,20m do meio-fio, conforme mostra a Figura 10.14.

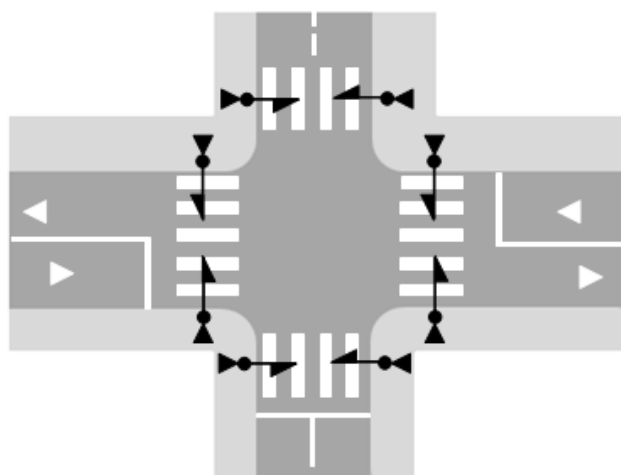



Figura 10.13: Posicionamento da botoeira junto à interseção

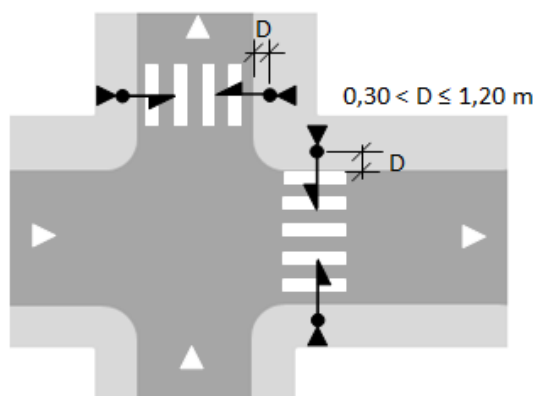



Figura 10.14: Afastamento da botoeira com relação ao meio-fio

Pode-se utilizar uma única botoeira para atender a duas travessias demandadas no mesmo estágio, desde que locada na área de ambas as travessias e respeitados os afastamentos laterais mínimos e máximos (ver Figura 10.15).

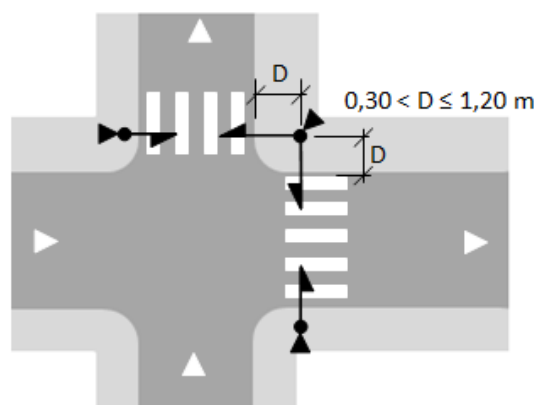



Figura 10.15: Botoeira única para atender duas travessias

A botoeira **deve** ser instalada a uma altura entre 0,80 e 1,20 metros, e vir acompanhada da placa ou adesivo educativo, conforme exemplos apresentados na Figura 3.9 do Capítulo 3.

O conjunto botoeira e placa ou adesivo **deve** ser instalado, preferencialmente, na coluna em que o grupo focal para pedestres estiver implantado, **devendo** estar visível e acessível ao pedestre.

Para a locação deste conjunto **deve** ser avaliada a direção dos fluxos de pedestres, o alinhamento das edificações e outras eventuais obstruções visuais.

Quando as condições de visibilidade não puderem ser atendidas pelo posicionamento padrão, pode-se locar o conjunto em ângulo diferente do usual ou utilizar duas placas ou adesivos, conforme exemplos mostrados nas Figuras 10.16 e 10.17.

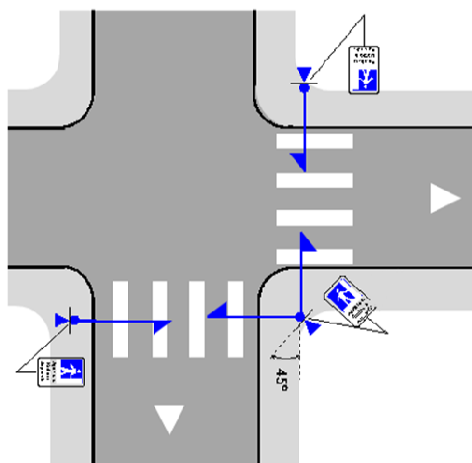



Figura 10.16: Posicionamento do conjunto em ângulo diferente do usual

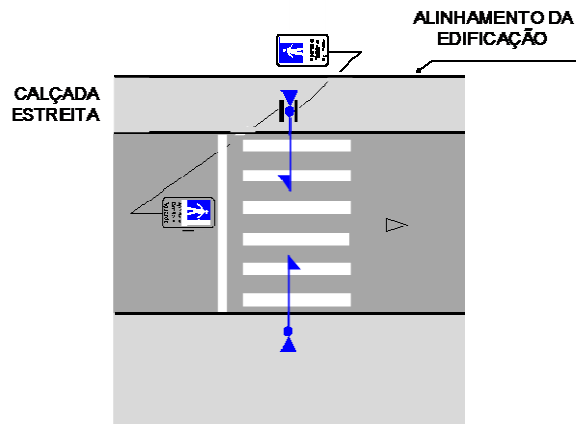



Figura 10.17: Uso de duas placas para sinalizar uma única botoeira

10.3 Semáforo de ciclistas

10.3.1 Critérios de uso de grupos focais de ciclistas

A implantação de grupos focais de ciclistas **deve** ocorrer sempre que as condições de circulação do tráfego no local justificar a definição de um estágio específico para o atendimento aos ciclistas.

Outros critérios para a implantação de grupos focais de ciclistas serão abordados em manual específico.

10.3.2 Visibilidade dos semáforos (grupos focais)

A indicação luminosa do grupo focal **deve** ser visível pelos ciclistas em toda a área de abrangência da sinalização horizontal (vermelha) que delimita a travessia. Os grupos focais de ciclistas **devem** ser posicionados de modo a não sofrer interferências visuais de postes de iluminação, controladores, colunas semafóricas, sinalização vertical, entre outras.

Por se tratar de uma travessia às vezes montada, recomenda-se que as colunas de semáforos para ciclistas fiquem posicionadas numa das extremidades da travessia.

10.3.3 Critérios para o projeto de locação

A locação de grupos focais para ciclistas **deve** seguir os seguintes critérios:

a) instalar pelo menos um grupo focal para cada sentido de movimento dos ciclistas, atendendo aos critérios de visibilidade indicados no item 10.3.2;

b) evitar o conflito com as indicações luminosas veiculares e dos pedestres;

c) no caso de calçada compartilhada com os pedestres, preservar o acesso às guias rebaixadas existentes ou a construir, inclusive para pedestres;

d) garantir o conforto dos ciclistas, interferindo o mínimo possível na sua circulação.

Atendidos os critérios anteriormente referidos, **deve-se** procurar reduzir o número de colunas a ser implantadas, considerando que podem ser fixados em uma mesma coluna mais de um grupo focal, veicular ou de pedestres.

10.3.4 Afastamento lateral e altura livre

O afastamento lateral e a altura livre **devem** seguir o exposto no item 10.2.4, referente ao semáforo para pedestres.

10.4 Critérios de locação do controlador semafórico

O controlador é o equipamento responsável pela execução da programação semafórica bem como pelo chaveamento (liga e desliga) das lâmpadas dos grupos focais.

A posição a ser escolhida para locação de controladores na via **deve** observar diversos itens envolvendo condições operacionais, de segurança e de otimização de materiais e serviços para a instalação. Os controladores **devem** ser locados:

a) de forma a garantir um afastamento lateral mínimo de 0,50m do meio-fio;

b) na calçada, de forma a não interferir na circulação de pedestres;

c) visando otimizar a quantidade de cabos e dutos de instalação elétrica, de grupos focais, de laços detectores e de rede de comunicação;

d) em locais com espaço suficiente para execução dos serviços de operação e manutenção, a fim de permitir que o técnico possa permanecer sobre a calçada com segurança;

e) em locais com boa visibilidade da área da interseção, a fim de facilitar a operação manual;

f) próximos ao ponto da rede elétrica que possa servir de tomada para a alimentação;

g) próximos à rede de comunicação com outros controladores ou com o centro de controle.

A instalação de controladores **não deve** ser feita em locais:

a) em que, havendo acidentes de trânsito, os veículos envolvidos tenham a tendência de atingir o controlador;

b) em que ocorrem manobras para acesso a lotes ou estacionamentos, para evitar acidentes com o controlador;

c) próximos a faixas de travessia de pedestres, interferindo no deslocamento dos mesmos;

d) com intensa movimentação de pedestres, tais como pontos de ônibus, estações do metrô, pontos comerciais;

e) próximos a cabos de alta tensão e linhas de trólebus/bondes;

f) sujeitos a enchentes e alagamentos; caso não seja possível evitar esses locais **deve-se** adotar bases mais altas para proteger o controlador da linha d’água;

g) ermos, que propiciem atos de vandalismo.

11 . REMOÇÃO DE SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA

11.1 Introdução

Conforme visto no Capítulo 4, o uso da sinalização semafórica, quando justificado, produz impactos positivos no controle de trânsito, apresentando muitas vantagens, seja no aumento da segurança, seja na melhoria da fluidez.

Desse modo, a avaliação da necessidade da permanência de uma sinalização semafórica é tão importante quanto a decisão de se implantar uma nova.

A dinâmica do trânsito em um local varia ao longo do tempo, por várias razões, tais como: variação do número de usuários do local; alteração no uso e ocupação do solo; e modificação das condições de circulação no entorno.

Essas alterações **devem** ser acompanhadas de ajustes na sinalização viária, incluindo a semafórica. Elas podem , inclusive, levar à necessidade da retirada da sinalização semafórica. Exemplos de situações em que a retirada da sinalização semafórica é recomendada:

a) término da intervenção na via pública ou em área adjacente (obra viária ou de edificação) que justificou a implantação da sinalização semafórica;

b) redução da intensidade do fluxo veicular a um nível que possibilite o controle do trânsito por outros meios, como minirrotatórias ou sinalização vertical de regulamentação de preferência de passagem;

c) desativação de um polo gerador de viagens, como um hospital, escola etc, cuja movimentação de usuários justificava a sinalização semafórica;

d) implantação de travessia de pedestres em desnível nas proximidades da travessia controlada por sinalização semafórica.

11.2 Metodologia de tomada de decisão para remoção de sinalização semafórica

A metodologia a ser utilizada para a decisão referente à remoção de sinalização semafórica envolve as seguintes atividades, a serem realizadas em sequência: estudo técnico; avaliação prática da operação sem sinalização semafórica; e tomada de decisão.

11.2.1 Estudo técnico

O estudo técnico **deve**:

a) resgatar o histórico da implantação da sinalização semafórica, verificando se ela foi implantada por questões de segurança, de fluxo, de atraso ou por combinação desses aspectos;

b) verificar se houve no local alterações no uso e ocupação do solo e/ou no fluxo, que teriam impacto sobre as condições consideradas para implantação da sinalização semafórica;

c) não havendo dados históricos sobre a implantação, verificar as condições de uso e ocupação do solo no local, bem como os fluxos de todos os tipos de usuários;

d) a partir das verificações indicadas nas alíneas “b” ou “c”, inferir o risco a que os usuários ficariam expostos no caso de remoção da sinalização semafórica;

e) realizar acompanhamento da operação da sinalização semafórica para verificar a obediência à sinalização, e coletar os dados necessários para rever a adequação da atual programação semafórica;

f) definir a programação semafórica mais adequada para o local levando em conta o tipo de controle existente;

g) implantar e acompanhar a programação semafórica, definida na alínea “f”, verificando se a presença da sinalização semafórica é dispensável em função dos fluxos a serem controlados;

h) a partir das análises realizadas nas alíneas “d” e “g” **deve-se** concluir pela permanência ou remoção da sinalização semafórica do local.

No caso de sinalização semafórica com dois estágios, sem estágio dispensável, a verificação indicada na alínea “g” consiste na observação em campo do número de ciclos vazios (número de ciclos sem demanda na via secundária e/ou sem a presença de pedestres na travessia crítica), na hora-pico para cada um dos tipos de demanda. Se esse número representar, pelo menos, oito ciclos da hora-pico correspondente, tem-se a indicação de que a sinalização semafórica é dispensável em função dos fluxos do estágio analisado. Esse critério corresponde ao dobro do número de ciclos vazios que recomendam a não implantação da sinalização semafórica em função do fluxo veicular (ver item 4.2.2).

No caso de sinalização semafórica com dois estágios, com estágio dispensável, a verificação indicada na alínea “g” consiste na observação em campo do número de vezes que o estágio dispensável foi implementado (por demanda veicular na via secundária e/ou por demanda de pedestre na botoeira), na hora-pico para cada um dos tipos de demanda. Se o estágio foi implementado em um número de vezes inferior a 15% do número máximo de ciclos que poderia ter ocorrido na hora-pico correspondente, tem-se a indicação de que a sinalização semafórica é dispensável em função dos fluxos do estágio analisado.

Em interseções controladas por mais de dois estágios (*n* estágios), as verificações anteriormente referidas para o estágio que serve à via secundária **devem** ser realizadas para todos os estágios. A sinalização semafórica somente **deverá** ser removidas e em “*n-1*” estágios a condição para retirada for atendida.

Havendo recomendação para a remoção da sinalização semafórica, **deve** ser elaborado o projeto de implantação da solução não-semafórica adequada, definida a partir das orientações do Capítulo 4.

Todos os documentos referentes à realização do estudo técnico **devem** ser reunidos e organizados em um relatório técnico, a fim de subsidiar o gestor de trânsito em sua decisão de retirada e servir como histórico para consultas futuras.

11.2.2 Avaliação prática da operação sem sinalização semafórica

No caso do estudo técnico recomendar a remoção da sinalização semafórica, **deve** ser realizada uma avaliação prática da implantação dessa medida antes de efetivá-la.

Essa avaliação consiste no desligamento dos semáforos por um tempo pré-estabelecido. Em geral, um período mínimo de um e máximo de três meses é o suficiente para que a intervenção esteja consolidada e a sinalização desativada possa ser retirada definitivamente.

Operacionalmente, esse procedimento **deve** ocorrer concomitantemente à implantação da solução não semafórica. Os semáforos **devem** ser desligados e ensacados (ou seja, recobertos, de preferência por plástico preto). Essa providência visa deixar mais clara ao condutor a desativação, evitando que a ausência da informação luminosa seja atribuída à falta de energia elétrica. Além disso, **devem** ser instaladas placas com a informação “Desligado” para todas as aproximações (Figura 11.1).

O desligamento da sinalização semafórica deve ser precedido de ampla divulgação junto aos usuários da via, seja por meio de dispositivos visuais (por exemplo, faixas de pano), seja por intermédio dos meios de comunicação.

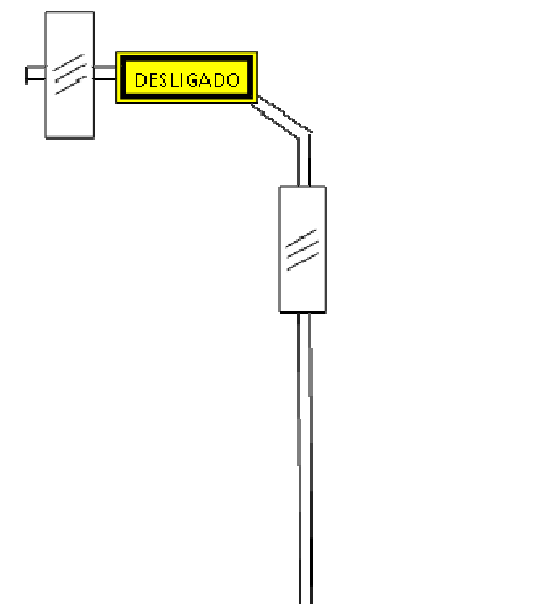
A partir do desligamento, o órgão gestor de trânsito **deve** acompanhar o comportamento do trânsito no local e aguardar eventuais manifestações dos usuários.

DESLIGADO

Figura 11.1: Grupos focais ensacados e placa “desligado”

No caso da solução não semafórica adequada implicar na implantação de alterações de geometria viária, tais como minirrotatórias, refúgios para pedestres, dentre outros, a avaliação prática descrita nesta seção pode ser dispensada, partindo-se diretamente para a tomada de decisão a partir do resultado do estudo técnico.

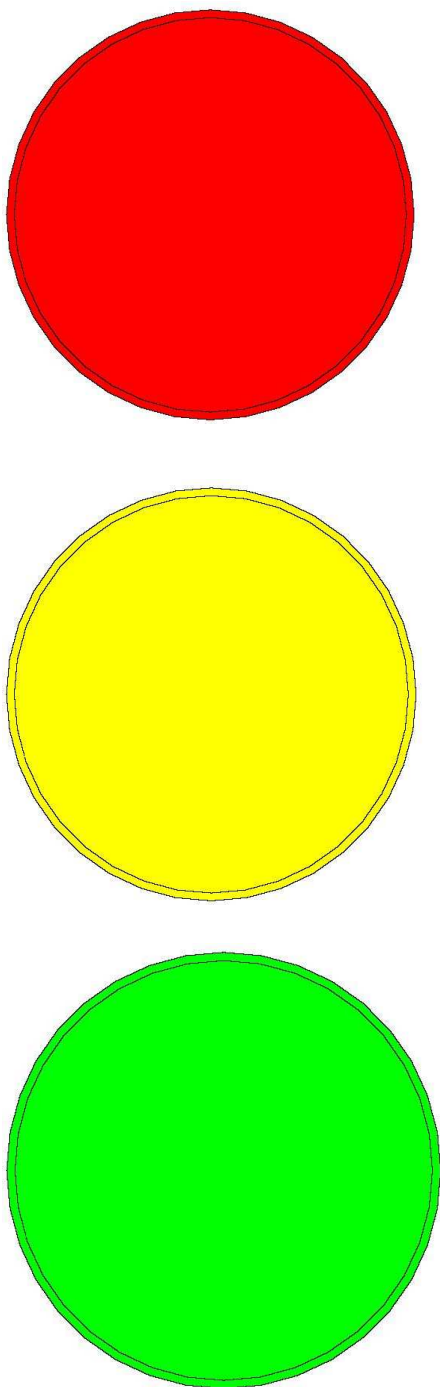
11.2.3 Tomada de decisão

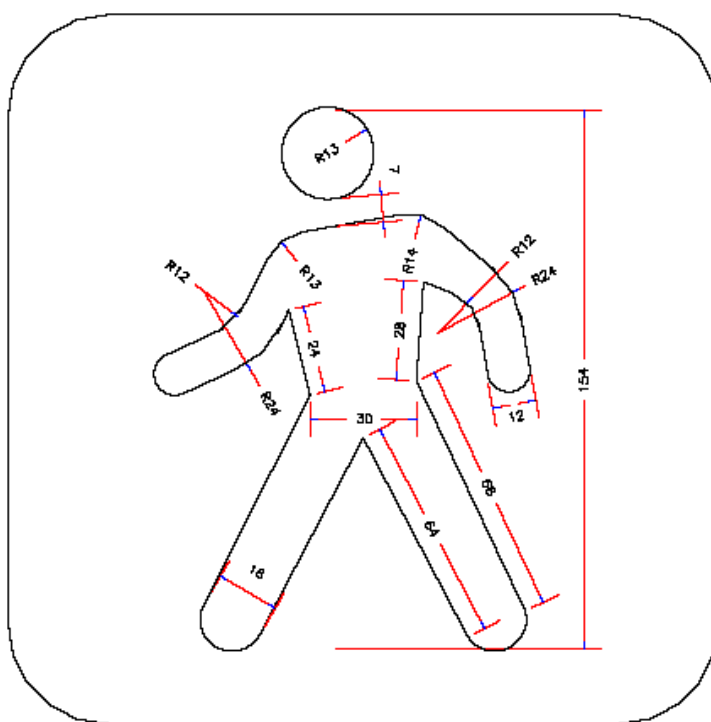
Com base nos resultados do acompanhamento realizado durante o período de avaliação prática, o órgão gestor **deve** definir sobre a remoção definitiva, ou não, da sinalização semafórica do local.

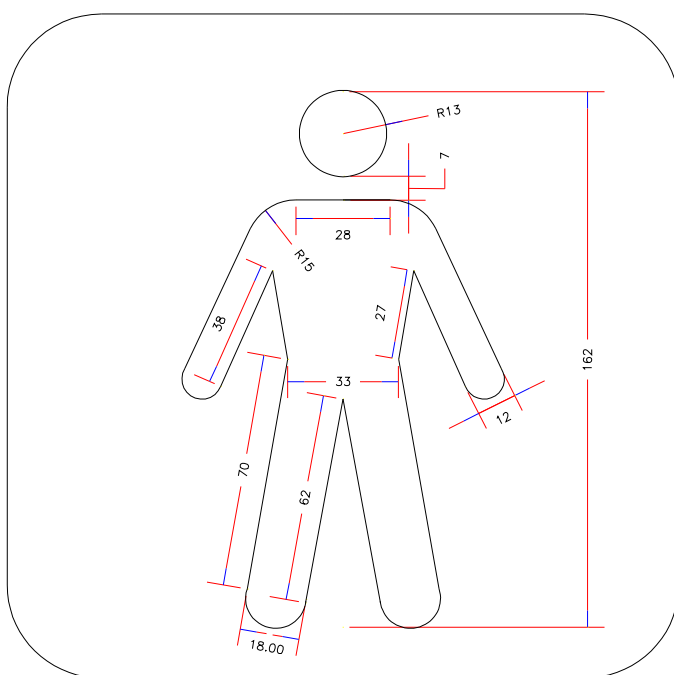
Todo o histórico até a desativação definitiva **deve** ser acrescido ao relatório técnico referido no item 11.2.1.

APÊNDICE 1 - Diagramação dos focos semafóricos e pictogramas

Lentes 200 mm

Norma ABNT NBR 7995

Máscara com pictograma "boneco andando" verde

Norma ABNT NBR 7995

Máscara com pictograma "boneco parado" vermelho

Norma ABNT NBR 7995

Tolerância ± 5%

Dimensões em milímetros

Máscara com pictograma "Seta" Verde 200 mm

Norma ABNT NBR 7995

1.6

130

90°

R415.9

4.75/7.9

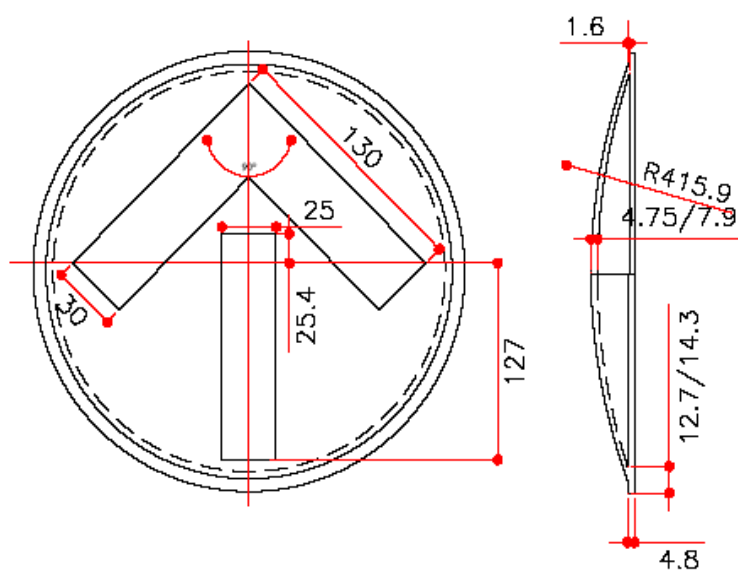
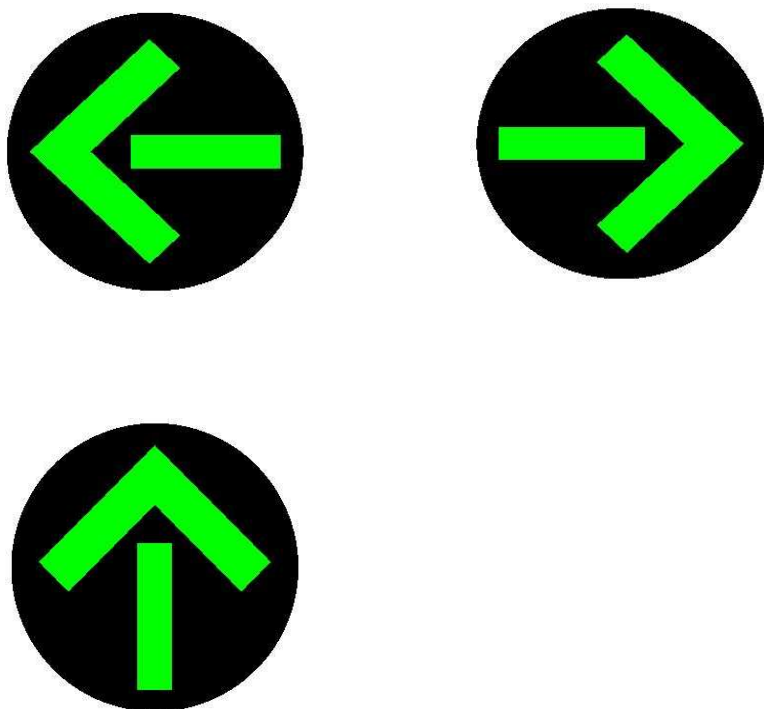
25

30

25.4

127

12.7/14.3

4.8

Tolerância ± 5%

Dimensões em milímetros

Máscara com pictograma "Seta" Vermelho 200 mm

Norma ABNT NBR 7995

1.6

130

R415.9

25

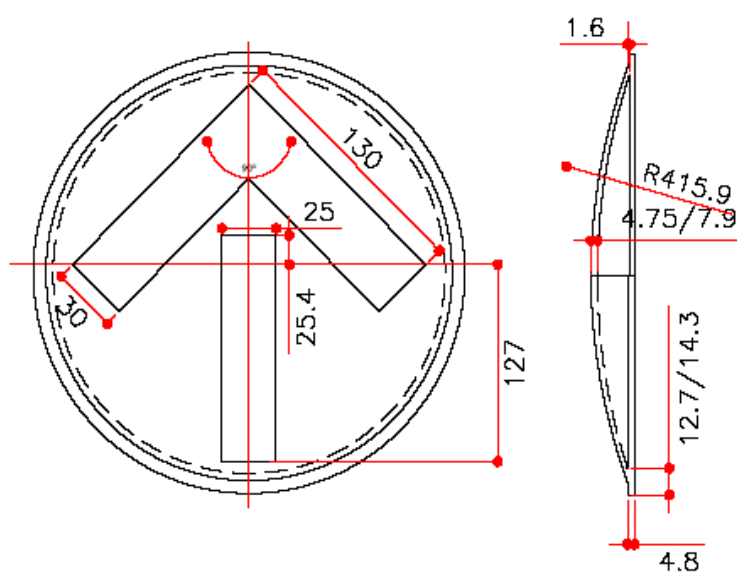
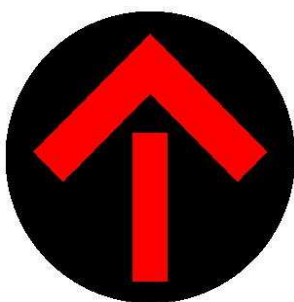
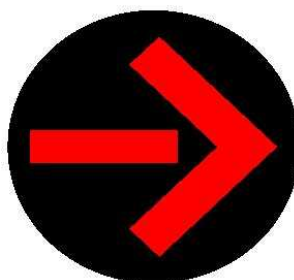
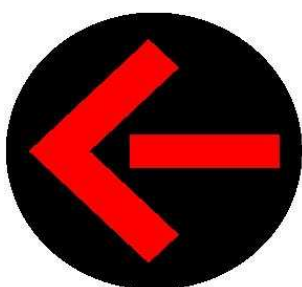
4.75/7.9

30

25.4

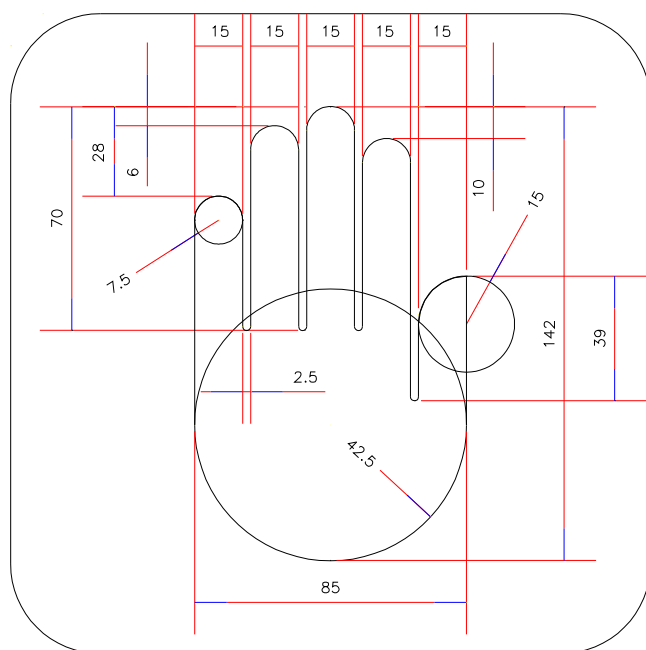
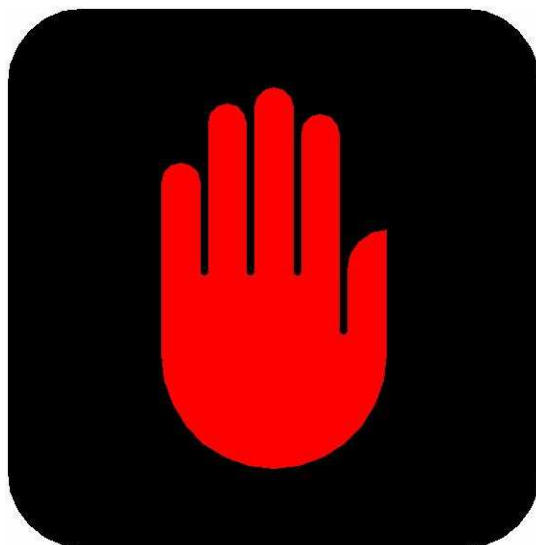
127

12.7/14.3

4.8

Tolerância ± 5%

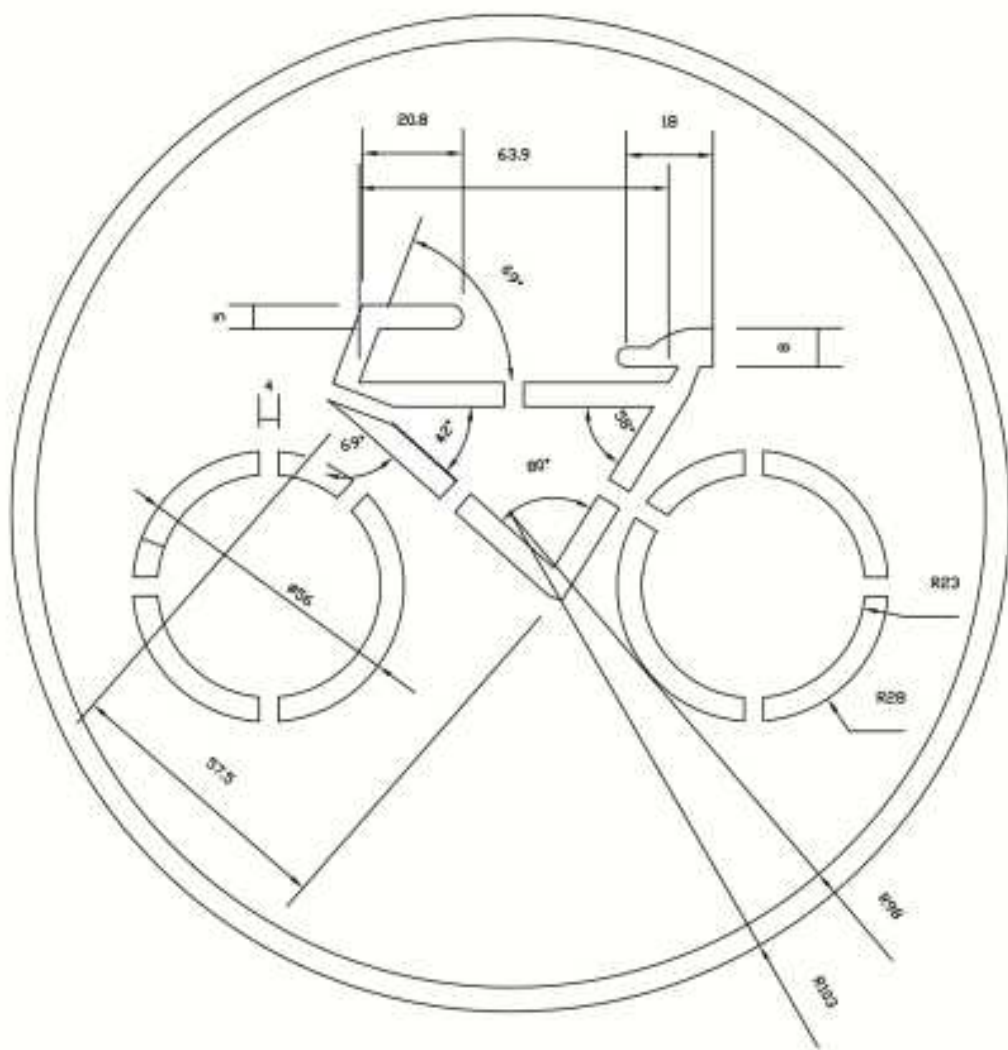
Dimensões em milímetros

Máscara com pictograma "mão espalmada" vermelho

Norma ABNT NBR 7995

Tolerância ± 5%

Dimensões em milímetros

Máscara com pictograma "bicicleta"

Norma ABNT NBR 7995

APÊNDICE 2- Pesquisas de Volume e tempo Médio de Espera de Pedestres

Para efeito deste Manual, travessia crítica de pedestres é a que ocorre na seção onde os pedestres têm mais dificuldade para atravessar ou o número de pedestres cruzando a via é maior.

A identificação da(s) travessia(s) crítica(s), quando em cruzamento, **deve** levar em conta todas as travessias existentes junto ao mesmo.

Neste anexo, são definidos os procedimentos a serem adotados na pesquisa do tempo médio de espera e na determinação do volume de pedestres na travessia crítica.

a) Determinação do volume de pedestres na travessia crítica

Para realizar a pesquisa de volume, são definidos segmentos viários com cerca de 25m de extensão na travessia crítica em cruzamentos, e com cerca de 50m no caso da travessia crítica para o meio de quadra (Ver Figura A2.1).

O termo "meio de quadra" não significa que a travessia ocorra exatamente no ponto médio entre uma rua e outra.

Nos locais (cruzamentos ou meios de quadra) onde não puder ser determinada *a priori* a posição da travessia crítica, os dados **devem** ser coletados nos diferentes segmentos onde essa travessia possa estar localizada.

Em cada segmento, **deve** ser contado o número total de pedestres que realiza a travessia em ambos os sentidos (contagem em separado por sentido). A contagem deve ser realizada no período mínimo de duas horas, em intervalos de 15 minutos.

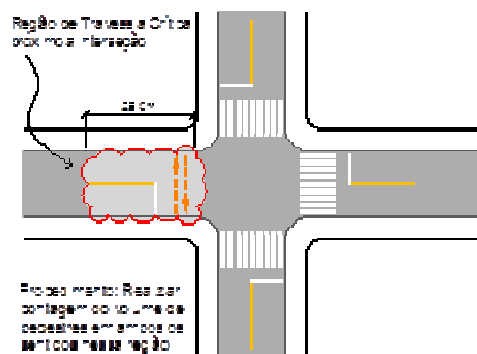
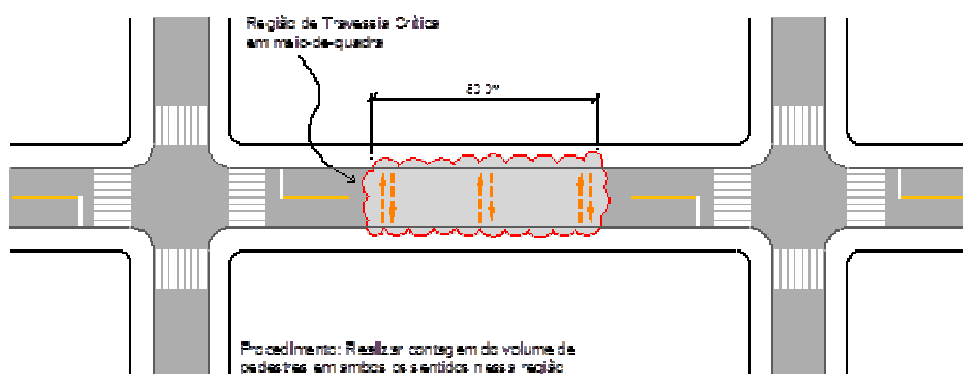
A determinação do horário de realização da contagem deve considerar o período do dia em que é observado o maior volume de travessia de pedestres.

(a) Contagem em intersecção

(b) Contagem em meio de quadra

Figura A2.1: Trechos para contagem do volume de pedestres

Os dados **devem** ser coletados e registrados a cada 15 minutos. Para facilitar a realização da pesquisa, os dados podem ser registrados de forma acumulada. Um modelo da planilha para a coleta desses dados de forma acumulada é mostrado na Figura A2.2.

Os dados mostrados na Figura A2.2 serão utilizados, como exemplo prático, para ilustrar os procedimentos descritos neste Apêndice.

PESQUISADOR:		FÁBIO		
Data:		03/04/08		Quinta - Feira
Condições do Tempo:			(x) Sol ( ) Nublado ( ) Chuva	
Hora			Sentido A-B	Sentido B-A
7:00	-	7:15	23	27
7:15	-	7:30	35	38
7:30	-	7:45	47	48
7:45	-	8:00	62	57
8:00	-	8:15	75	65
8:15	-	8:30	86	78
8:30	-	8:45	99	82
8:45	-	9:00	106	91
9:00	-	9:15	115	100
9:15	-	9:30	125	107

Figura A2.2: Trecho de planilha exibindo horários e dados (acumulados) de uma contagem de pedestres.

De posse dos dados da pesquisa, **deve** ser considerado o volume horário crítico (4 períodos consecutivos de 15 minutos), por meio do preenchimento da planilha mostrada na Figura A2.3.

Os dados mostrados na planilha da Figura A2.3 correspondem ao tratamento dos dados apresentados na Figura A2.2.

PERÍODO			SENTIDO A-B	(%)	SENTIDO B-A	(%)	TOTAL
07:00	**-**	**08:00**	**62**	**52%**	**57**	**48%**	**119**
07:15	-	08:15	52	58%	38	42%	90
07:30	-	08:30	51	56%	40	44%	91
07:45	-	08:45	52	60%	34	40%	86
08:00	-	09:00	44	56%	34	44%	78
08:15	-	09:15	40	53%	35	47%	75
08:30	-	09:30	39	57%	29	43%	68

Figura A2.3: Modelo da planilha para determinação do volume horário crítico de travessia de pedestres

De acordo com a planilha, o volume horário crítico ocorre no período das 07:00 às 08:00, e é igual a 119 pedestres.

b) Determinação do tempo médio de espera de pedestres na travessia crítica

O tempo de espera é definido como o intervalo entre o momento em que o pedestre se posiciona para realizar a travessia e o instante em que ele efetivamente a inicia. A pesquisa de tempo de espera é realizada na travessia crítica, determinada de acordo com os critérios definidos anteriormente.

A pesquisa deve ser realizada por pelo menos um pesquisador posicionado em cada lado da travessia. Para a determinação do tempo médio de espera deve ser coletado um número mínimo de observações, conforme procedimento indicado na seção “c” deste Apêndice.

No exemplo da Figura A2.3, o tamanho da população alvo é de 119 pedestres e foram selecionados 75 pedestres para compor a amostra (ver seção “c”). Nesse caso, em função da proporção da população em cada sentido, o número de observações no sentido A-B é igual a 39 (52% de 75) e no sentido B-A é igual a 36 (48% de 75).

A seleção dos pedestres que integrarão a amostra deve ser feita de modo aleatório, a fim de garantir a sua representatividade. Para tanto, recomenda-se que a pesquisa seja feita de forma contínua, observando-se a seguinte regra prática: ao término da medição do tempo de espera de um determinado pedestre, o pesquisador **deve** efetuar a coleta de dados do próximo pedestre que chegar ao local.

Sempre que possível, o número total de pedestres na travessia (em ambos os sentidos) deve ser recontado durante o horário crítico, em paralelo à pesquisa do tempo médio de espera, para efeito da aplicação do critério de implantação da sinalização semafórica. Caso contrário,

o volume a ser usado é o obtido na pesquisa anterior para a determinação do volume da travessia crítica.

O formulário levado a campo pelos pesquisadores pode ter o formato mostrado na Figura A2.4.

LOCAL:				
Horário Crítico: 7:00 – 08:00		**Volume no período: 119 pedestres**		
TE: Tempo de Espera (s)	**Horário**	**Período**	**Data**	**Pesquisador**
23	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
8	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
81	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
18	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
12	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
97	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
68	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
9	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
34	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
18	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
31	7:00	pm	09/05/08	Gilvan
77	7:15	pm	09/05/08	Gilvan
85	7:15	pm	09/05/08	Gilvan
64	7:15	pm	09/05/08	Gilvan
17	7:15	pm	09/05/08	Gilvan
44	7:15	pm	09/05/08	Gilvan
13	7:15	pm	09/05/08	Gilvan
31	7:15	pm	09/05/08	Gilvan
27	7:15	pm	09/05/08	Gilvan
55	7:30	pm	09/05/08	Gilvan
23	7:30	pm	09/05/08	Gilvan
...	...	...	...	...
64	8:00	pm	09/05/08	Gilvan
76	8:00	pm	09/05/08	Gilvan
Nº de observações	75			
Média (s)	47,1			
Desvio-padrão (s)	27,2			

Figura A2.4: Planilha contendo tempos de espera coletados

O tempo médio de espera calculado, com base nos tempos de espera medidos em campo para os pedestres integrantes da amostra de tamanho "***n***" (ver Equação A2.1), corresponde à estimativa pontual do tempo médio de espera dos pedestres na travessia crítica $\left(\overline{TME}_{Pontual}\right)$.

$$\overline{TME}_{Pontual} = \frac{\sum_{i=1}^{n} TE_i}{n} \tag{A2.1}$$

O intervalo de confiança para o tempo médio de espera dos pedestres na travessia crítica $\left(\overline{TME}_{IC}\right)$**,** para o nível de significância (α) e erro de estimativa (e_0), **deve** ser calculado pela Equação A2.2.

$$\overline{TME}_{IC} = \overline{TME}_{Pontual} \pm e_0 \tag{A2.2}$$

O erro da estimativa (e_0) é obtido a partir do valor do desvio-padrão da amostra (S), do tamanho da população (N), do tamanho da amostra (n) e do nível de significância desejado (α), de acordo com a Equação A2.3.

$$e_o = t_{n-1,\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \times \left(\sqrt{\frac{N-n}{N-1}}\right) \tag{A2.3}$$

Na Equação A2.3, $t_{n-1,\alpha/2}$ é o valor da estatística ***t*** de Student, definido em função do tamanho da amostra e do nível de significância desejado (**α**).Esse valor pode ser obtido da Tabela A2.1, onde são apresentados os valores para os níveis de significância comumente empregados. Para valores do nível de significância desejado diferentes de 5% e 10%, deverá ser consultada uma tabela mais geral da distribuição t.

Tabela A2.1: Distribuição t de Student – valores de $t_{n-1,\alpha/2}$

GRAU DE LIBERDADE (N-1)	$T_{N-1, A/2}$ PARA NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA - A (%)	
	α = 5% (α /2=2,5%)	**α = 10% (α /2=2,5%)**
7	2,365	1,895
8	2,306	1,860
9	2,262	1,833
10	2,228	1,812
11	2,201	1,796
12	2,179	1,782
13	2,160	1,771
14	2,145	1,761
15	2,131	1,753
16	2,120	1,746
17	2,110	1,740
18	2,101	1,734
19	2,093	1,729
20	2,086	1,725
21	2,080	1,721
22	2,074	1,717
23	2,069	1,714
24	2,064	1,711

Tabela A2.1: Distribuição t de Student – valores de $t_{n-1,\alpha/2}$ (continuação)

GRAU DE LIBERDADE (n-1)	$t_{n-1,\alpha/2}$ PARA NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA - α (%)	
	α = 5% (α /2=2,5%)	**α = 10% (α /2=2,5%)**
25	2,060	1,708
26	2,056	1,706
27	2,052	1,703
28	2,048	1,701
29	2,045	1,699
30	2,042	1,697
∞	1,960	1,645

Para o exemplo mostrado na Figura A2.4, os seguintes dados foram obtidos:

- ✓ o tempo médio de espera de 47,1s;
- ✓ desvio-padrão igual a 27,2s;
- ✓ amostra com 75 elementos;

Para o nível de significância α=5% e número total de pedestres na travessia N=119, o erro da estimativa obtido pela Equação A2.3 é de 3,8s.

O exemplo da Figura A2.4 resulta em:

$$\overline{TME}_{Pontual} = 47{,}1s \text{ e } \overline{TME}_{IC} = 47{,}1s \pm 3{,}8s = [43{,}3s; 50{,}9s]$$

c) Determinação do tamanho da amostra (n)

A determinação do número de pedestres a ser incluído na amostra (**n**), para a estimativa do tempo médio de travessia da população alvo (volume de pedestres na travessia crítica), é feita de acordo com as seguintes etapas:

Etapa 1: *Definir uma amostra piloto de tamanho igual a* ***n’***

Recomenda-se adotar ***n'***=30 e coletar em campo esse número de observações de tempo de espera.

Distribuir essas observações nos dois sentidos da travessia, de acordo com as proporções verificadas na determinação do volume total de pedestres na travessia crítica.

Por exemplo, na situação mostrada na Figura A2.3, foram efetuadas 16 observações no sentido A-B (52% de 30) e 14 no sentido B-A (48% de 30).

Etapa 2: *Calcular a média e o desvio-padrão para os dados da amostra piloto*

O tempo médio de espera $\left(\overline{TME}\right)$ é calculado pela Equação A2.4, e o desvio-padrão (***S***) por meio da Equação A2.5.

Nessas equações, $\boldsymbol{TE_i}$ é o tempo de espera observado para o i-ésimo pedestre e ***n'*** o tamanho da amostra piloto.

$$\overline{TME} = \frac{\sum_{i=1}^{n'} TE_i}{n'} \qquad \text{(A2.4)}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n'} \left(TE_i - \overline{TME}\right)^2}{n'-1}} \qquad \text{(A2.5)}$$

Para o caso do exemplo da Figura A2.3, foi obtido:

$\overline{TME} = 44{,}9s$

$S = 27{,}8s$

Etapa 3: *Selecionar o nível de significância para a estimativa (α)*

Recomenda-se adotar nível de significância (α) igual a 5%, que corresponde a um nível de confiança de 95%, utilizado para estimar o intervalo de confiança do tempo médio de espera.

Etapa 4: *Selecionar o valor do erro admissível para a estimativa (E)*

O erro da estimativa (**E**), para efeito da determinação de **n**, deve ser definido pelo usuário levando em conta as características específicas de cada local, dentre as quais a mais relevante é o tempo de espera.

Na Tabela A2.1 são apresentadas recomendações para o valor do erro da estimativa (***E***) a ser adotado para o cálculo do tamanho da amostra (**n**), em função do valor do tempo médio de espera calculado para a amostra piloto $\left(\overline{TME}\right)$.

Tabela A2.2: Valores recomendados para o erro da estimativa (E)

TEMPO MÉDIO DE ESPERA (S)	ERRO DA ESTIMATIVA (S)
TME ≤ 20	1
20 < TME ≤ 30	2
30 < TME ≤ 40	3
40 < TME ≤ 50	4
50 < TME ≤ 60	5
TME > 60	6

Para o exemplo da Figura A2.3, onde $\overline{TME} = 44{,}9s$, foi adotado E = 4s, conforme a Tabela A2.1.

Etapa 5: *Calcular o valor do tamanho da amostra (n)*

O tamanho da amostra (***n***), conhecido o volume de pedestres na travessia crítica (***N***), é calculado pela Equação A2.6, deduzida a partir da equação A2.3. Todos os elementos da expressão já foram definidos anteriormente.

$$n = \frac{\left(t_{n'-1,\alpha/2}\right)^2 \times S^2 \times N}{E^2(N-1) + \left(t_{n'-1,\alpha/2}\right)^2 \times S^2} \qquad \text{(A2.6)}$$

(A2.6)

No exemplo da Figura A2.3, os dados necessários para a utilização da Equação A2.6 são:

- ✓ N = 119 pedestres
- ✓ n' = 30 pedestres
- ✓ S = 27,8s
- ✓ E = 4s
- ✓ $t_{n'-1,\alpha/2} = t_{29;0,025} = 2{,}045$

Os dados apresentados acima levam a **n**=75.

Etapa 6: *Comparar o valor de **n** com **n'***

O valor obtido na Etapa 5 (**n**) **deve** ser comparado com o número de elementos da amostra piloto (**n'**), definido na Etapa 1.

Se **n** ≤ **n'**, os resultados da amostra piloto podem ser adotados para a estimativa do tempo médio de travessia da população alvo.

Se **n**>**n'**, **deve** ser coletado no campo um número adicional de dados de tempo de espera, que corresponde à diferença entre **n** e **n'**.

Esses dados adicionais também **devem** ser coletados nos dois sentidos, respeitadas as proporções do volume total de pedestres na travessia crítica por sentido.

Para o exemplo da Figura A2.3, **devem** ser coletados 45 novos tempos de espera (75-30=45), 23 no sentido A-B (52% de 45) e 22 no sentido B-A (48% de 45). Assim, a amostra **n** será formada por 39 elementos no sentido A-B (16+23=39) e 36 no sentido B-A (14+22=36).

d) Estimativa do valor do parâmetro de verificação da necessidade da sinalização semafórica para a travessia crítica (PVer)

Esta estimativa é realizada como segue:

- ✓ cálculo da estimativa por ponto do valor do parâmetro de verificação $(PVer_{Pontual})$ por meio da Equação A2.7, na qual $\overline{TME}_{Pontual}$ é o tempo médio de espera determinado com base na amostra (n), e N é o número de pedestres na travessia crítica;

$$PVer_{Pontual} = \overline{TME}_{Pontual} \times N \qquad \text{(A2.7)}$$

- ✓ cálculo da estimativa do intervalo de confiança do parâmetro de verificação $(PVer_{IC})$, para o nível de significância adotado (ver Equação A2.8), sendo e0 o erro calculado para a estimativa do tempo médio de espera (ver Equação A2.3) e N o número de pedestres na travessia crítica.

$$PVer_{IC} = PVer_{Pontual} \pm (e_0 \times N) \qquad \text{(A2.8)}$$

Portanto, os valores limites do intervalo de confiança são:

Limite inferior: $[LI = PVer_{Pontual} - (e_0 \times N)]$

Limite superior: $[LS = PVer_{Pontual} + (e_0 \times N)]$

A verificação da necessidade da implantação da sinalização semafórica **deve** ser feita com base na comparação dos valores limites de $(PVer_{IC})$ com o valor crítico de 4.750 (pedestres/hora)x segundo:

- ✓ para LI >4.750, a implantação da sinalização semafórica é justificada pelo critério;
- ✓ para LS<4.750, a implantação da sinalização semafórica não é justificada pelo critério;

- ✓ para os casos em que LI ≤ 4.750 ≤ LS, a decisão para implantação do semáforo fica condicionada a análises complementares por parte do técnico encarregado do estudo.

No exemplo mostrado na Figura A2.4, o tempo médio de espera é de 47,1 segundos, o volume determinado para o horário crítico é de 119 pedestres e o erro da estimativa igual a 3,8 segundos.

Neste caso, tem-se que:

$$PVer_{Pontual} = \overline{TME}_{Pontual} \times N = 47{,}1 \times 119 = 5.605 \text{ (pedestres/hora)x segundo}$$

$$LI = PVer_{Pontual} - (e_0 \times N) = 5.605 - (3{,}8 \times 119) = 5.153 \text{ (pedestres/hora)x segundo}$$

$$LS = PVer_{Pontual} + (e_0 \times N) = 5.605 + (3{,}8 \times 119) = 6.057 \text{ (pedestres/hora)x segundo}$$

Conclusão: Para o exemplo prático da Figura A2.3, como ***LI >4.750***, a implantação da sinalização semafórica é justificada pelo critério.

APÊNDICE 3 – Coleta de dados de volume de veículos

Este apêndice apresenta o método mais utilizado para coleta de dados de volume de veículos, tanto direcional como classificatório. Este método não considera a utilização de equipamentos eletrônicos como *palms*, contadores automáticos, entre outros.

O dia escolhido para a realização da coleta deve ser representativo da situação para a qual a programação semafórica será elaborada, caracterizando-se como um dia típico. Esta coleta, por exemplo, pode ser realizada em dias úteis, feriados e finais de semana, de modo a permitir a programação semafórica específica para cada um desses dias.

Ao ser definido o cruzamento em que se deseja realizar a pesquisa, recomenda-se observar, inicialmente, a variação do volume de tráfego ao longo do dia típico, para selecionar os períodos em que a coleta de dados deve ser realizada. Dependendo do local, pode ser necessário fazer a coleta em 2 ou mais períodos ao longo de um dia típico.

A3.1) PESQUISA DIRECIONAL

A pesquisa direcional tem por objetivo determinar o volume de tráfego em cada aproximação, separado por movimento. Seu resultado, expresso em veículos por hora, é utilizado na programação semafórica quando o fluxo de saturação (ver item 6.4 do Manual) for obtido também nessa unidade.

Recomenda-se a presença de um pesquisador para cada aproximação, de modo que cada um colete dados de, no máximo, 3 movimentos (por exemplo, em frente, à direita e à esquerda) o que reduz erros de contagem.

Os pesquisadores de campo, munidos de um croqui do cruzamento e de pranchetas com contadores manuais de tráfego, registram em formulário próprio os veículos de cada movimento a cada intervalo de 15 minutos. A Figura A3.1 mostra um exemplo da folha de campo a ser utilizada pelos pesquisadores.

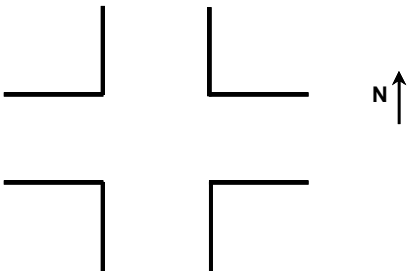
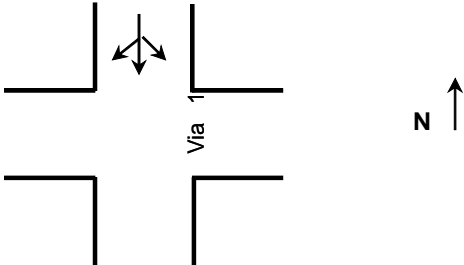
Os dados são preenchidos de forma acumulada, para que não seja necessário zerar os contadores a cada período de 15 minutos. No campo “observações” o pesquisador deve registrar qualquer evento que possa ter influenciado nos resultados da coleta, inclusive quanto às condições do tempo.

PESQUISA DE VOLUME DE TRÁFEGO DIRECIONAL			
Local: x			
Aproximação:			
Croqui: N			
Pesquisador:			
Data: Dia da Semana:			
Hora	↖	↑	↗
7:00 - 7:15			
7:15 - 7:30			
7:30 - 7:45			
7:45 - 8:00			
8:00 - 8:15			
8:15 - 8:30			
8:30 - 8:45			
8:45 - 9:00			
9:00 - 9:15			
9:15 - 9:30			
Observações:			

Figura A3.1: Exemplo de folha de campo para pesquisa volumétrica direcional

A3.2) PESQUISA DIRECIONAL E CLASSIFICATÓRIA

A pesquisa direcional e classificatória é realizada quando há necessidade de se conhecer a composição do tráfego no cruzamento. Ela permite a determinação do volume de tráfego equivalente, que é o volume de tráfego coletado expresso em unidades de carro de passeio (ver item 6.2 do Manual). O volume equivalente é utilizado na programação semafórica quando o fluxo de saturação for determinado também em unidades de carro de passeio.

Na pesquisa direcional e classificatória, é importante frisar que será necessária uma quantidade maior de pesquisadores, especialmente se o cruzamento tiver muitas aproximações. Como sugestão, pode-se adotar dois pesquisadores para cada aproximação, de modo que cada um colete dados de tipos específicos de veículos. Estes tipos devem ser indicados no campo apropriado do formulário (ver exemplo da Figura A3.2).

Os dados são coletados a cada 15 minutos e são preenchidos de forma acumulada, para que não seja necessário zerar os contadores a cada período de 15 minutos. No campo "observações" o pesquisador deve registrar qualquer evento que possa ter influenciado nos resultados da coleta, inclusive quanto às condições do tempo.

PESQUISA DE VOLUME DE TRÁFEGO DIRECIONAL E CLASSIFICATÓRIA

Local:

Aproximação:

Croqui:

Via 1

N

Pesquisador:

Data: **Dia da Semana:**

Selecionar tipo(s) de veículo a ser pesquisado:

☐ **Bicicleta** ☐ **Motocicleta** ☐ **Automóvel** ☐ **Ônibus** ☐ **Caminhão**

Hora	↖	↑	↗	↖	↑	↗
7:00 - 7:15						
7:15 - 7:30						
7:30 - 7:45						
7:45 - 8:00						
8:00 - 8:15						
8:15 - 8:30						
8:30 - 8:45						
8:45 - 9:00						
9:00 - 9:15						
9:15 - 9:30						

Observações:

Figura A3.2: Folha de campo para pesquisa volumétrica classificatória e direcional (motocicleta e caminhão/ônibus)

APÊNDICE 4 - Medição do tempo total de espera dos veículos da via secundária

Este apêndice apresenta um método para medição em campo do tempo total de espera (atraso) dos veículos da via secundária de uma interseção onde se estuda a viabilidade da instalação de um semáforo.

A determinação desse atraso é requerida no bloco ***[e]*** do fluxograma da Figura 4.9 do item 4.2.2 deste Manual, onde são definidos os critérios para implantação da sinalização semafórica em locais existentes: abordagem veículos.

A4.1 - PROCEDIMENTO PARA COLETA DOS DADOS

a) Atividades preliminares

a.1. Estabelecer qual será a aproximação da via secundária a ser pesquisada para o caso da via ser de mão dupla. A aproximação a ser pesquisada é a mais crítica, ou seja, aquela que apresenta as maiores filas.

a.2. Escolher o horário a ser pesquisado. A pesquisa deve ser feita durante a hora mais crítica em termos de espera, do ponto de vista da via secundária. Para se determinar qual é o horário crítico deve-se fazer vistorias variadas ao longo do dia e, também, conversar com usuários do cruzamento ou moradores e comerciantes do local.

a.3. Uma vez estabelecido o horário a ser pesquisado, o trabalho de campo deve ser planejado, tomando o cuidado de se escolher um dia típico, ou seja, com o comportamento normal do trânsito, para efetuar a pesquisa.

b) Dados a serem coletados

Contar a quantidade de veículos equivalentes que esperam em fila a cada intervalo de 5 segundos, para deixar a via secundária e cruzar ou entrar na principal (empregar a Tabela 6.1, do Capítulo 6). Para efeito desse estudo as motos não devem ser contadas, já que as mesmas não são consideradas nos limites estabelecidos no bloco ***[f]*** do fluxograma da Figura 4.9 do item 4.2.2 deste Manual. Os resultados devem ser registrados em uma planilha, cujo modelo é mostrado na Figura A4.1. Recomenda-se fazer o trabalho em dupla: um dos pesquisadores conta os veículos e o outro acompanha o tempo e faz as anotações.

Cruzamento:		
Aproximação:		Sentido:
Data:	hora de início:	hora de término:
Pesquisadores:		
Observações:		

		segundos												Subtotal
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
	0													
	1													
	2													
	3													
	4													
	5													
	6													
	7													
	8													
	9													
	10													
	11													
	12													
	13													
minutos	14													
	15													
	16													
	17													
	18													
	19													
	20													
	21													
	22													
	23													
	24													
	25													
	26													
	27													
	28													
	29													
	30													
	31													
	32													
	33													
	34													
	35													
	36													
	37													
	38													
	39													
	40													
	41													
	42													
	43													
minutos	44													
	45													
	46													
	47													
	48													
	49													
	50													
	51													
	52													
	53													
	54													
	55													
	56													
	57													
	58													
	59													
													TOTAL	

Figura A4.1: Planilha para a coleta de dados

c) Recomendações gerais para a coleta de dados

c.1. Não é viável um único pesquisador contar os veículos equivalentes, acompanhar o tempo e anotar a quantidade contada na planilha. No entanto, existem alternativas para a realização da pesquisa por uma pessoa apenas, usando-se um cronometro que emita um “bip” a cada 5 segundos, ou computadores de mão que tenham recursos especiais de contagem. De qualquer modo, é importante que o método adotado garanta que o resultado da pesquisa não tenha variações significativas entre os valores medidos e a realidade.

c.2. Na realização da pesquisa em dupla, o pesquisador-contador deve contar, mentalmente, o número de veículos equivalentes que está na fila da aproximação pesquisada. Só devem ser contados os veículos que estejam parados (ou seja, foram retidos pelo volume da via principal). Veículos que chegam na aproximação e passam sem parar não devem ser contados. O pesquisador contador deve falar em voz alta o número de veículos da fila apenas quando o pesquisador-anotador der o sinal que terminou o intervalo de 5 segundos.

c.3. O pesquisador que vai anotar os dados deve estar munido de prancheta, formulário específico (planilha mostrada na Figura A4.1) e cronômetro. Antes de iniciar a pesquisa o cabeçalho do formulário deve ser preenchido. Iniciada a pesquisa, dispara-se o cronômetro e o pesquisador-anotador deve emitir um aviso ao final de cada intervalo de 5 segundos (algo como "vai!" ou "já!") e em seguida anotar no campo apropriado da planilha o valor informado pelo pesquisador-contador. Não havendo veículo na fila, o campo respectivo deve ser preenchido com zero. A planilha tem 12 colunas (o que corresponde a um minuto de pesquisa) e 60 linhas, perfazendo uma hora. Serão preenchidos 720 intervalos na planilha. Para duplas iniciantes, recomenda-se um treinamento antes de iniciar a pesquisa oficial.

A4.2 – TRATAMENTO DOS DADOS

Inicialmente, para cada linha da planilha, deve ser determinada a soma dos valores registrados para cada intervalo de 5s. Essa soma deve ser registrada na coluna "**Subtotal**". Posteriormente, a soma de todos os valores dessa coluna é realizada e registrada no campo nomeado "**TOTAL**", localizado na parte inferior da planilha. Esse valor, multiplicado por 5 (cinco), permite a determinação do tempo total de espera dos veículos observados, expresso em veículos equivalentes X segundo.

No CD que acompanha o presente manual é apresentada uma planilha eletrônica para efeito da determinação do tempo total de espera dos veículos da via secundária. Os valores pesquisados em cada intervalo, e o número total de veículos observados no período devem ser digitados nos campos correspondentes.

A planilha eletrônica também indica a conveniência ou não da implantação do semáforo de acordo com os critérios estabelecidos no bloco ***[f]*** do fluxograma da Figura 4.9 do item 4.2.2 deste Manual.

APÊNDICE 5 : TESP – Tempo de Espera de Pedestres

A5.1 - APRESENTAÇÃO

TESP é um programa de computador que estima o tempo de espera médio previsto para os pedestres poderem dar início à travessia de uma via em função do volume de veículos, do tempo de travessia e do número de faixas. Está disponível na página www.denatran.gov.br da Internet, acompanhando este Volume V. Ele foi desenvolvido para subsidiar o critério de implantação de semáforos em locais em fase de projeto, sob a abordagem "pedestres", descrito no item 4.2.3 do Manual de Sinalização Semafórica.

A5.2 - PARA CRIAR UM NOVO PROJETO

Para criar um projeto, o primeiro passo é abrir o arquivo TESP – Tempo de espera de pedestres que se encontra disponível nas versões Excel 2003 (extensão xls) e Excel 2007 (extensão xltm).

Provavelmente, ao abrir o arquivo, aparecerá um aviso de segurança informando que parte do conteúdo ativo foi desabilitada. Neste caso, é necessário clicar no botão "Opções", ao lado do aviso e, em seguida, escolher a alternativa "Habilitar este conteúdo".

Inserem-se os dados de entrada e pede-se para TESP calcular os resultados. A situação processada pode ser arquivada através do recurso "Salvar como", atribuindo ao novo arquivo um nome que caracterize o projeto em análise e escolhendo como tipo de arquivo ou a pasta de trabalho Excel 2003 (extensão xls) ou a pasta de trabalho Excel 2007 (extensão xlsx).

A5.3 - PREENCHIMENTO DOS DADOS

Todos os dados inseridos devem se referir à hora mais crítica do dia que ocorre quando os pedestres têm mais dificuldade para atravessar ou quando o número de pedestres cruzando a via é maior.

Volume de pedestres – deve ser informado o total de pedestres durante a hora crítica, somados ambos os sentidos de travessia.

Tempo de travessia – recomenda-se que o projetista considere a velocidade dos pedestres igual a 1,2 m/s. Dependendo das características específicas dos pedestres no local em estudo, podem ser adotados valores inferiores. O tempo de travessia deve considerar apenas o tempo necessário para o pedestre vencer a largura da pista na velocidade considerada; o programa já computa, automaticamente, seu tempo de percepção e reação.

Número de faixas – a quantidade informada refere-se ao número de faixas utilizadas pelos veículos em movimento. Enquanto para o tempo de travessia o que vale é a largura total da pista incluindo eventuais estacionamentos, aqui se deve informar somente o número de faixas, por sentido, em que os veículos circulam. É possível simular até 8 faixas de tráfego; no caso de mão dupla, tal limite se refere à soma das faixas nos dois sentidos de circulação. Em vias com canteiro central, os dados de entrada devem se referir a cada pista em separado. Isto é, a análise deve ser realizada em duas etapas, cada uma como sendo para uma via de mão única. O técnico deve levar em conta o tempo de espera para a travessia de cada pista para efeito da decisão da implantação da sinalização semafórica.

Volume de veículos – volume de veículos observado durante a hora crítica, expresso em termos de unidades de carros de passeio (ucp/h). O valor se refere ao conjunto de todas as faixas com o mesmo sentido de circulação.

A5.4 - METODOLOGIA ADOTADA NO CÁLCULO DO TEMPO DE ESPERA

A filosofia adotada pelo TESP é simular, segundo a segundo, o que ocorre na realidade. O resultado final não é, portanto, deduzido a partir de expressões analíticas, mas contabilizado, diretamente, da interação entre veículos e pedestres que é representada no modelo.

Tanto os veículos como os pedestres são gerados segundo a Distribuição de Poisson. Para cada uma das faixas de rolamento, impõe-se a condição de contorno de que não pode haver mais de um veículo em cada intervalo de 2 segundos numa mesma seção da via, o que implica num fluxo de saturação, por faixa, igual a 1800 ucp/h.

O volume informado para certo sentido da via é dividido igualmente entre as faixas correspondentes.

Levando em conta que a geração dos pedestres e veículos é feita através de processo aleatório, o programa simula por dez vezes a hora crítica e fornece a média aritmética das esperas obtidas nessas dez simulações a fim de obter um resultado representativo.

O próximo passo consiste em tratar a travessia de pedestres, em si.

O programa vai somando os tempos de espera individuais dos pedestres desde o momento em que chegam na calçada até o momento em que iniciam sua travessia.

TESP adota um tempo de percepção e reação do pedestre igual a 1 segundo no caso de mão única; no caso de mão dupla, este tempo é aumentado para 2 segundos a fim de representar a maior dificuldade de avaliação de brechas.

Para que um pedestre aceite realizar uma travessia é necessário que os dois seguintes requisitos sejam cumpridos simultaneamente:

a) Durante a travessia, deve haver, no mínimo, a distância correspondente a uma faixa de rolamento, entre o pedestre e qualquer veículo que se encontre na mesma seção;

b) Deve haver um intervalo igual ou superior a três segundos entre a passagem do pedestre por um ponto e a passagem de um veículo por esse mesmo ponto.

A5.5 - A RESPEITO DO TESP

A metodologia do programa foi desenvolvida pelo grupo encarregado da elaboração do Manual de Sinalização Semafórica, sendo o aplicativo elaborado pelo Eng. Luis Molist Vilanova, da CET/SP.

APÊNDICE 6 – Fluxo de Saturação

Este apêndice aborda métodos para a coleta de dados e, quando esta não for possível, para a estimativa do fluxo de saturação em aproximações controladas por semáforo.

Os conceitos básicos necessários à perfeita compreensão dos métodos abordados neste apêndice são apresentados ao longo do Manual de Sinalização Semafórica e encontram-se reunidos no seu GLOSSÁRIO.

A6.1 – MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DO FLUXO DE SATURAÇÃO

A seguir são apresentados dois métodos para medição do fluxo de saturação e determinação dos tempos perdidos em cada estágio. O usuário deverá selecionar aquele que considerar mais adequado para a situação específica sob análise, levando em conta, também, a disponibilidade de recursos para a coleta dos dados em campo.

Nos dois métodos a presença de motocicletas na determinação do fluxo de saturação e tempos perdidos só será considerada quando o técnico considerar que a presença desses veículos afeta a condição normal de operação dos demais veículos no local.

A6.1.1 – Método 1

a) Objetivo

Permitir a medição *in loco* do **fluxo de saturação por faixa de trânsito** em aproximações controladas por semáforo, juntamente com a determinação dos tempos perdidos inicial e final de cada estágio. Nesse método a fila é observada em separado para cada faixa de trânsito, e não na aproximação como um todo. Ele é derivado do método original do *HCM – Highway Capacity Manual-HCM 2000* (TRB, 2000).

b) Dados a serem coletados

A coleta de dados deve ser realizada mediante o preenchimento da planilha mostrada na Figura A6.1, que reúne observações realizadas em uma única faixa de trânsito.

Como a medição do tempo perdido final só pode ser realizada em ciclos saturados, a coleta de dados deve ser realizada no maior número possível de ciclos nessa condição. Para a faixa estudada, um ciclo é considerado saturado quando a fila da faixa não é completamente dissipada quando inicia a indicação vermelha.

<table>
<tr><td colspan="2">Cidade: ____________________________________
Local: _____________________________________
Aproximação: _______________________________
Observador: ________________________________
Tempo: ___________________________________

Movimentos permitidos na faixa estudada:
( ) Em frente ( ) À direita ( ) À esquerda

Data: __/__/__ Hora: _______</td><td colspan="3">Croqui da interseção:
• mostrar todas as faixas das aproximações, com os respectivos movimentos permitidos;
• identificar a faixa estudada.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Posição do veículo na fila da faixa</td><td>Ciclo 1</td><td>Ciclo 2</td><td>Ciclo 3</td><td>Ciclo 4</td></tr>
<tr><td>Tempo</td><td>Tempo</td><td>Tempo</td><td>Tempo</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>16</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>17</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>18</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>19</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>20</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>f>20</td><td>f=</td><td>f=</td><td>f=</td><td>f=</td></tr>
<tr><td>Outros dados</td><td>Hf =</td><td>Hf =</td><td>Hf=</td><td>Hf=</td></tr>
<tr><td>Duração do tempo verde</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Observações</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Duração do entreverdes</td><td colspan="4">Amarelo =
Vermelho geral =</td></tr>
<tr><td colspan="5">VP = veículo pesado; C = conversão (E = esquerda, D = direita)</td></tr>
</table>

Figura A6.1: Planilha do Método 1

b.1) Dados específicos dos tempos de passagem dos veículos da fila

Na Tabela A6.1 são apresentados os dados a serem coletados, referentes à passagem dos veículos da fila sobre a linha de retenção, em função da duração do tempo de verde do estágio onde o fluxo de tráfego da faixa é servido.

Tabela A6.1: Tempos de passagem dos veículos sobre a linha de retenção

	Duração do tempo de verde do estágio (s)	
	< 25	**≥ 25**
Dados a serem coletados	H3, H4, Hfs, Hf	H4, Hfs, Hf

Legenda:

H3 = tempo transcorrido entre o inicio da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do terceiro veículo da fila (em segundos).

H4 = tempo transcorrido entre o inicio da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do quarto veículo da fila (em segundos).

Hfs = tempo transcorrido entre o início da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do último veículo da fila que é servido durante o tempo verde (em segundos). A posição desse veículo na fila é "**fs**".

Hf = tempo transcorrido entre o início da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do último veículo proveniente da fila que passa sobre a linha de retenção (LR). A posição desse veículo na fila é "**f**". Em ciclos não saturados, o f-*ésimo* veículo é efetivamente o último veículo da fila. Em ciclos saturados ele é o último veículo da fila que é servido no estágio (após o término do tempo de verde).

b.2) Instruções gerais para a coleta de dados

- ✓ A coleta de dados não deve ser realizada para ciclos em que a fila presente na faixa no início do verde é inferior a 6 veículos, ou quando o trecho a jusante não tiver capacidade de absorver os veículos que cruzam a linha de retenção.
- ✓ A coleta de dados é encerrada com a medição de Hf, que é o tempo transcorrido entre o início do verde e a passagem das rodas traseiras do último veículo da fila que cruza a linha de retenção, sendo f a posição desse veículo na fila.
- ✓ No caso de f<20, a posição do veículo na fila correspondente ao último valor de tempo registrado é verificada diretamente na planilha da Figura A6.1.
- ✓ No caso de f>20, informar na linha iniciada pelo campo "f >20" o valor de f, registrando no campo correspondente da linha "Outros dados" o valor do Hf.

- ✓ No campo “Observações” registrar para cada ciclo eventos que podem interferir nos resultados das medições, especialmente bloqueio da faixa, indicando o momento em que cada evento ocorreu.

c) Procedimentos de cálculo

Os procedimentos a seguir apresentados devem ser adotados para cada um dos ciclos observados em cada faixa. Deve ser observado que:

- ✓ o fluxo de saturação da faixa é dado pela média aritmética dos fluxos de saturação obtidos para os ciclos observados. O mesmo se aplica para a determinação do tempo perdido inicial e do tempo perdido final;

- ✓ o fluxo de saturação de um grupo de movimentos é obtido pela soma dos fluxos de saturação das faixas de trânsito que o servem;

- ✓ quando o tempo perdido inicial (t_{pin}) determinado para um ciclo for inferior a 1(um) segundo, o ciclo deve ser descartado para efeito do cálculo do tempo perdido, e considerado com reserva no cálculo do fluxo de saturação. Esse valor para o t_{pin} indica que algum problema ocorreu no escoamento da fila ou, eventualmente, na própria coleta dos dados;

- ✓ quando o tempo perdido final (t_{pfn}) determinado para um ciclo for inferior a zero, o ciclo deve ser descartado para efeito do cálculo do tempo perdido final e considerado com reserva no cálculo do fluxo de saturação.

- ✓ ciclos com valores de t_{pin} e t_{pfn} muito superiores aos observados nos demais ciclos considerados podem indicar problema localizado no escoamento da fila ou, eventualmente, na coleta de dados. A critério do responsável pelo estudo, os dados dos ciclos nessa situação podem ser descartados para efeito do cálculo dos tempos perdidos. Os dados desses ciclos também devem ser considerados com alguma reserva no cálculo do fluxo de saturação.

c.1) Para ciclos não saturados

$$Hm = \frac{Hf - H4}{f - 4} \tag{1}$$

$$FS = \frac{3600}{Hm} \tag{2}$$

$$t_{pin} = H4 - (4 \times Hm) \tag{3}$$

sendo:

Hm = *headway* médio para a faixa, no ciclo considerado (em segundos);

FS = fluxo de saturação (em veículos por hora de tempo verde);

t_{pi} = tempo perdido inicial (em segundos);

H4 = tempo transcorrido entre o inicio da indicação verde e a passagem das

rodas traseiras do quarto veículo da fila (em segundos);

Hf = tempo transcorrido entre o início da indicação verde e a passagem das

rodas traseiras do último veículo proveniente da fila que passa sobre

a linha de retenção (em segundos);

f = posição do último veículo da fila que passa sobre a linha de retenção.

Observações:

- ✓ Quando "f" for menor do que 8 é conveniente descartar o ciclo. Se essa situação for uma constante, no caso de aproximação com tempo de verde inferior a 25 segundos, convém ajustar o método, adotando as Equações 4 e 5 no lugar das Equações 1 e 3. Em qualquer caso, o ciclo deve ser descartado para f<6.

$$Hm = \frac{Hf - H3}{f - 3} \qquad (4)$$

$$t_{pin} = H3 - (3 \times Hm) \qquad (5)$$

sendo **H3** o tempo transcorrido entre o início da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do terceiro veículo da fila (em segundos).

c.2) Para ciclos saturados

$$Hm = \frac{Hfs - H4}{fs - 4} \qquad (6)$$

$$FS = \frac{3600}{Hm} \qquad (7)$$

$$t_{pin} = H4 - (4 \times Hm) \qquad (8)$$

$$Tf = (t_{v,real} + t_{ent}) - Hfs \qquad (9)$$

$$t_{pfn} = Tf - [(f - fs) \times Hm] \qquad (10)$$

sendo:

Hm = *headway* médio para a faixa, no ciclo considerado (em segundos);

FS = fluxo de saturação (em veículos por hora de tempo verde);

t_{pin} = tempo perdido inicial (em segundos);

H4 = tempo transcorrido entre o inicio da indicação verde e a passagem das

rodas traseiras do quarto veículo da fila (em segundos);

Hfs = tempo transcorrido entre o início da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do último veículo proveniente da fila que passa sobre a linha de retenção durante o verde (em segundos);

Tf = duração do último intervalo de observação, que vai da passagem das rodas traseiras do veículo ***fs*** até o final do estágio (em segundos);

$t_{v,real}$ = duração do tempo de verde do estágio considerado (em segundos);

t_{ent} = duração do tempo de entreverdes do estágio considerado (em segundos);

t_{pfn} = tempo perdido final (em segundos);

f = posição do último veículo da fila que passa sobre a linha de retenção.

Observações

- ✓ Valores de Hf superiores à soma dos tempos de verde e entreverdes indica que houve infração à sinalização semafórica. Nesse caso, os ciclos onde a situação foi observada não devem ser considerados para efeito do cálculo do tempo perdido final.

- ✓ No caso de aproximação com tempo de verde inferior a 25 segundos, quando "fs" for menor do que 10, convém ajustar o método, adotando as Equações 11 e 12 no lugar das Equações 6 e 8. Em qualquer caso, o ciclo deve ser descartado para fs < 8.

$$Hm = \frac{Hfs - H3}{fs - 3} \qquad (11)$$

$$t_{pin} = H3 - (3 \times Hm) \qquad (12)$$

sendo **H3** o tempo transcorrido entre o início da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do terceiro veículo da fila (em segundos).

c.3) Para a faixa considerada

O fluxo de saturação e tempos perdidos para a faixa considerada é calculado pela média aritmética dos valores obtidos para cada ciclo.

d) Exemplo de aplicação do Método 1

Considere os dados da planilha mostrada na Figura A6.2, referente a Aproximação **1** do cruzamento das vias "**XX**" e "**YY**". Essa aproximação é formada por uma única faixa de trânsito, para a qual pretende-se calcular o fluxo de saturação e os tempos perdidos. A interseção é controlada por um semáforo de tempo fixo, com dois estágios (um para atender o tráfego da via "**XX** e o outro para a via "**YY**"). O estágio que serve a Aproximação **1** tem

tempo de verde igual a 40s e entreverdes de 5s. O ciclo é igual a 80 s. A coleta de dados compreendeu 15 ciclos, dois quais 02 não estavam saturados e em 01 foi observada infração à sinalização semafórica.

Na planilha da Figura A6.2 estão apresentados os dados coletados nos quatro primeiros ciclos, para permitir a apresentação dos cálculos do fluxo de saturação e tempos perdidos.

Cidade: Brasília
Local: Interseção da Via XX com a Via YY
Aproximação: 1, localizada na Via XX
Observador: José
Tempo: Nublado
Movimentos permitidos na faixa estudada:
(X) Em frente (X) A direita ( ) A esquerda

Data: 07/04/2009 **Hora:** 08h00m

Croqui da interseção:

- mostrar todas as faixas das aproximações, com os respectivos movimentos permitidos;
- identificar a faixa estudada.

(inserir o desenho)

Posição do veículo na fila	Ciclo 1 Tempo	Ciclo 2 Tempo	Ciclo 3 Tempo	Ciclo 4 Tempo
1				
2				
3				
4	9,43	10,11	10,46	9,80
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17			37,80	
18		38,50		39,67
19	39,20			
20			42,74	43,15
f>20	**f= 21**	**f= 21**	**f=**	**f=**
Outros dados	Hf=42,13	Hf=46,37	Hf=	Hf=
Duração do tempo verde	40s	40s	40s	40s
Observações		Último veículo passou após a abertura do verde para o fluxo oposto		
Duração do entreverdes	**Amarelo = 3s** **Vermelho geral = 2s**			
VP = veículo pesado; C = conversão (E = esquerda, D = direita)				

Figura A6.2: Planilha usada para a coleta de dados (Exemplo M1)

Os dados coletados nos demais ciclos não são apresentados, porém os resultados obtidos para todos os ciclos são apresentados na Tabela A6.2. A seguir apresenta-se, a título de exemplo, os cálculos efetuados para os ciclos 1 e 2.

<u>Cálculos para o Ciclo 1:</u>

H4 = 9,43s

Hfs = 39,20s

fs = 19

f = 21

$$Hm = \frac{Hfs - H4}{fs - 4} = \frac{39,20 - 9,43}{19 - 4} = 1,98 \quad segundos / veiculo$$

$$FS = \frac{3600}{Hm} = \frac{3600}{1,98} = 1818,18 \quad veículos / hora$$

$$t_{pin} = H4 - (4 \times Hm) = 9,43 - (4 \times 1,98) = 1,51 \ \ segundos$$

$$Tf = (t_{v,real} + t_{ent}) - Hfs = (40 + 5) - 39,20 = 5,80 \ \ segundos$$

$$t_{pfn} = Tf - [(f - fs) \times Hm] = 5,80 - [(21 - 19) \times 1,98] = 1,84 \ \ segundos$$

<u>Cálculos para o Ciclo 2:</u>

H4 = 10,11s

Hfs = 38,50s

fs = 18

f = 21 (como Hf > 45, t_{pfn} não será calculado)

$$Hm = \frac{Hfs - H4}{fs - 4} = \frac{38,50 - 10,11}{18 - 4} = 2,03 \quad segundos / veiculo$$

$$FS = \frac{3600}{Hm} = \frac{3600}{2,03} = 1773,40 \quad veículos / hora$$

$$t_{pin} = H4 - (4 \times Hm) = 10,11 - (4 \times 2,03) = 1,99 \ \ segundos$$

Tabela A6.2: Resumo dos valores calculados para os 15 ciclos observados

Ciclo	**FS (vph)**	**t_{pin}(s)**	**t_{pfn}(s)**	**Obs.**
1	1818,18	1,51	1,84	
2	1773,40	1,99	------	Des. à sinalização
3	1714,29	2,06	0,90	
4	1690,14	1,28	1,07	
5	1884,82	1,15	1,82	
6	1592,92	2,52	1,80	
7	1967,21	1,11	------	Ciclo não saturado
8	1967,21	1,10	1,84	
9	1904,76	1,69	1,77	
10	1894,74	1,88	------	Ciclo não saturado
11	1773,4	1,90	2,51	
12	1914,89	1,40	2,21	
13	1791,04	1,07	1,67	
14	1935,48	1,71	2,36	
15	1988,95	1,32	1,99	
Média	1840,76	1,58	1,82	
Desvio-Padrão	116,35	0,43	0,47	

De acordo com os resultados da Tabela A6.2, tem-se que:

- ✓ Fluxo de saturação (FS) = 1840 vph
- ✓ Tempo perdido inicial (t_{pin}) = 1,58 s
- ✓ Tempo perdido final (t_{pfn}) = 1,82 s

Considerando o estudo realizado como um estudo piloto, o técnico deverá verificar se é necessário retornar a campo para coletar dados adicionais. Para tanto, deverá adotar o procedimento indicado no item A6.2.1.

A6.1.2 – Método 2

a) Objetivo:

Permitir a medição *in loco* do **fluxo de saturação por grupo de movimentos, que se utilizam de uma ou mais faixas de trânsito** em aproximações controladas por semáforo, juntamente com a determinação dos tempos perdidos inicial e final de cada estágio. Ele é derivado do método original da *Road Note 34* (RRL, 1963) e do método adotado pela Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET, 2001).

Durante a aplicação do método, o semáforo **deve** estar operando em tempo fixo visando simplificar o procedimento de coleta de dados em campo.

b) Dados a serem coletados

A coleta de dados deve ser realizada mediante o preenchimento da planilha mostrada na Figura A6.3, que reúne observações realizadas em uma única faixa de trânsito ou num conjunto de faixas.

A decisão de observar mais de uma faixa em conjunto deve considerar as características de utilização das faixas quando a corrente de tráfego inclui conversões à direita e/ou à esquerda.

O tempo de duração do estágio (verde mais entreverdes) é dividido em intervalos com duração de 5 segundos. Se esse tempo não for múltiplo de 5s, o último intervalo (NI) terá duração inferior a 5s. Para o desenho do histograma de tráfego, a altura desse intervalo é ajustada (ver item c).

A contagem é iniciada na abertura do tempo de verde e realizada até o instante em que a fila de veículos é dissipada. Se a dissipação da fila ocorrer no meio de um intervalo de 5 segundos durante o período de verde, este intervalo é desconsiderado. Para cada intervalo considerado é feita a contagem do número de veículos que cruza a linha de retenção, e esse valor é registrado cumulativamente na coluna correspondente ao ciclo observado (ver Figura A6.3).

Instruções gerais para a coleta de dados

- ✓ A contagem deve ser feita no momento em que o veículo cruzar a linha de retenção.
- ✓ Só serão considerados os dados coletados referentes a ciclos em que a saída dos veículos da fila se desenvolva no patamar de saturação por um período de, no mínimo, cinco intervalos e o trecho a jusante do semáforo puder acomodar totalmente esses veículos.
- ✓ Quando o método é usado para medir o fluxo de saturação global em um conjunto de faixas de trânsito, o registro do número de veículos partindo por intervalo deve ser interrompido quando deixa de existir fila em uma ou mais faixas.

- ✓ O número de intervalos (onde a contagem foi realizada) a ser considerado para a determinação do fluxo de saturação é o número de intervalos onde a indicação verde é observada ao longo de toda sua extensão, excluindo-se o primeiro intervalo.

- ✓ O número de veículos observado no primeiro intervalo é considerado para a determinação do tempo perdido inicial.

- ✓ Intervalos formados, total ou parcialmente, pelo tempo de entreverdes somente são considerados para a determinação do tempo perdido final (t_{pfn}).

- ✓ No campo "Observações" registrar para cada ciclo eventos que podem interferir nos resultados das medições, especialmente bloqueio da faixa, indicando o momento em que cada evento ocorreu.

Cidade: ____________________________________
Local: _____________________________________
Aproximação: _______________________________
Observador: ________________________________
Tempo: ____________________________________

Movimentos permitidos na(s) faixa(s) estudada(s):
( ) Em frente ( ) A direita ( ) A esquerda

Data: __/__/__ Hora: _______

Croqui da interseção:

- mostrar todas as faixas das aproximações, com os respectivos movimentos permitidos;
- identificar a(s) faixa(s) estudada(s).

Intervalo		**Número de veículos acumulados por intervalo**					**Média (acum.)**	**Média por intervalo**
Ordem	**Duração (s)**	**Ciclo 1**	**Ciclo 2**	**Ciclo 3**	**...**	**Ciclo NC**		
1	**00-05**							
2	**05-10**							
3	**10-15**							
4	**15-20**							
5	**20-25**							
6	**25-30**							
7	**30-35**							
8	**35-40**							
9	**40-45**							
10	**45-50**							
11	**50-55**							
12	**55-60**							
13	**60-65**							
14	**65-70**							
---	**...**							
n	**NI**							
Outros								
Duração do tempo verde (s)								
Saturado?								
Duração do Entreverdes								
Observações								

Legenda:
NC = número de ciclos observados
NI = último intervalo associado ao tempo de duração do estágio
Tempo verde = duração do tempo de verde do estágio no ciclo considerado
Saturado? Preencher cada coluna com a letra “**S**”, para ciclo saturado ou “**N**”, caso contrário.

Figura A6.3: Planilha para a coleta de dados (Método 2)

c) Procedimentos de cálculo

Deve ser observado que:

- ✓ quando o tempo perdido inicial (t_{pin}) determinado para um ciclo for inferior a 1(um) segundo, tem-se a indicação de que algum problema ocorreu no escoamento da fila ou, eventualmente, na própria coleta dos dados; nesse caso o ciclo deve ser descartado para o cálculo do tempo perdido inicial e considerado com reserva no cálculo do fluxo de saturação;

- ✓ quando o tempo perdido final (t_{pfn}) determinado para um ciclo for inferior a zero, o ciclo deve ser descartado para efeito do cálculo do tempo perdido final e considerado com reserva no cálculo do fluxo de saturação.

- ✓ ciclos com valores de t_{pin} e t_{pfn} muito superiores aos observados nos demais ciclos considerados podem indicar problema localizado no escoamento da fila ou, eventualmente, na coleta de dados. A critério do responsável pelo estudo, os dados dos ciclos nessa situação podem ser descartados para efeito do cálculo dos tempos perdidos. Os dados desses ciclos também devem ser considerados com alguma reserva no cálculo do fluxo de saturação.

Inicialmente deve ser determinado o número de veículos que partiu da fila em cada intervalo (NVIj), a partir do número acumulado registrado na planilha para cada intervalo (NV_j). Usar a Equação 13.

O fluxo de saturação para cada ciclo é determinado pela Equação 14, levando em conta somente os intervalos saturados, excluindo o primeiro e, no caso de ciclos saturados, os que contenham parte do entreverdes.

Essa determinação deve ser realizada somente se o número de intervalos saturados for igual ou superior a cinco.

$$NVI_j = NV_j - NV_{j-1} \qquad (13)$$

$$FS = \frac{\sum_{j=2}^{NIS} NVI_j}{5 \times (NIS - 1)} \qquad (14)$$

sendo:

FS = fluxo de saturação do ciclo, expresso em veículos por segundo;

NVI_j = número de veículos no intervalo “j”;

NIS = número de intervalos saturados do ciclo, excluindo os que contenham parte do entreverdes.

Para expressar o FS do ciclo em veículos por hora, multiplica-se o valor obtido na Equação 14 por 3600.

O valor do Fluxo de Saturação para o grupo de movimentos é então determinado pela média aritmética dos valores de FS, obtidos para cada ciclo pesquisado. O mesmo procedimento aplica-se para a determinação dos tempos perdidos inicial e final para o grupo de movimentos.

Recomenda-se que os valores encontrados para NVI_j sejam representados graficamente, na forma de um histograma de tráfego, para complementar a análise.

d) Desenho do histograma de tráfego

O histograma referente aos dados coletados apresenta no eixo horizontal todos os intervalos que compõem o estágio estudado, e no eixo vertical o número de veículos.

Para cada intervalo saturado é registrado o valor calculado do número médio de veículos, determinado a partir dos valores obtidos pela Equação 13 (ver exemplo de aplicação do Método 2).

No caso do último intervalo ter duração diferente de 5s, a altura desse intervalo é ajustada pela Equação 15, e sua base é desenhada como tendo 5s.

$$A_{NI} = \frac{MI_{NI}}{D_{NI}} \times 5 \qquad (15)$$

sendo:

A_{NI} = altura do último intervalo para o desenho do histograma (em veículos);

MI_{NI} = número médio de veículos no último intervalo;

D_{NI} = duração do último intervalo (em segundos).

O tempo perdido inicial para cada ciclo é obtido pela Equação 16 e o tempo perdido final pela Equação 17.

No caso da determinação do tempo perdido final são considerados os intervalos formados, no todo ou em parte, pelo tempo de entreverdes. Isto é, o último intervalo e, em alguns casos, o penúltimo. Para o cálculo desse tempo o ciclo deve ser saturado.

$$t_{pin} = 5 - \frac{NVI_1}{FS} \qquad (16)$$

$$t_{pfn} = DIEV - \frac{NVIEV}{FS} \qquad (17)$$

sendo:

t_{pin} = tempo perdido inicial, em segundos;

NVI_1 = número de veículos no intervalo 1;

FS = fluxo de saturação, em veículos por segundo;

t_{pfn} = tempo perdido final, em segundos;

DIEV = soma da duração dos intervalos que contenham parte do entreverdes, em segundos;

NVIEV = soma do número de veículos dos intervalos que contenham parte do entreverdes.

e) Exemplo de aplicação do Método 2

Considere os dados da planilha mostrada na Figura A6.4, referente à Aproximação **1** do cruzamento das vias Avenida AAA e Rua BBB. Essa aproximação é formada por quatro faixas de trânsito, e a interseção é controlada por um semáforo de tempo fixo. No período da coleta de dados o ciclo era de 120, e o estágio que serve a aproximação estudada tem tempo de verde igual a 62s e entreverdes igual a 5 s. A coleta de dados compreendeu 16 ciclos. Não foi observada infração à sinalização semafórica.

Cidade: Palmeiras Local: Avenida AAA X Rua BBB Aproximação: Avenida AAA (sentido Norte/Sul) Observador: João Pedro Tempo: ______________________________ Movimentos permitidos na(s) faixa(s) estudada(s): (X) Em frente ( ) A direita ( ) A esquerda Data: __/__/__ Hora: _______	**Croqui da interseção:** • mostrar todas as faixas das aproximações, com os respectivos movimentos permitidos; • identificar a(s) faixa(s) estudada(s). **(inserir figura)**

Intervalo		**Número de veículos acumulados por intervalo**															
Ordem	**Duração (s)**	**Ciclo 1**	**Ciclo 2**	**Ciclo 3**	**Ciclo 4**	**Ciclo 5**	**Ciclo 6**	**Ciclo 7**	**Ciclo 8**	**Ciclo 9**	**Ciclo 10**	**Ciclo 11**	**Ciclo 12**	**Ciclo 13**	**Ciclo 14**	**Ciclo 15**	**Ciclo 16**
1	**00-05**	7	5	7	5	8	5	4	12	10	9	9	4	5	6	7	10
2	**05-10**	12	15	19	15	16	21	13	25	20	20	15	13	13	13	18	18
3	**10-15**	21	18	24	26	26	27	23	33	26	28	22	24	19	24	28	27
4	**15-20**	30	25	32	35	34	32	34	39	36	34	31	33	30	31	38	37
5	**20-25**	40	37	44	46	40	41	43	46	45	42	38	41	39	39	50	46
6	**25-30**	48	46	55	52	48	49	49	52	56	49	46	47	46	49	58	53
7	**30-35**	57	51	61	63	55	55	56	59	65	60	56	56	50	56	65	59
8	**35-40**	67	60	69	73	63	65	64	64	73	65	67	63	59	63	71	65
9	**40-45**	76	70	76	80	68	73	75	73	84	74	75	73	69	70	77	70
10	**45-50**	79	80	84	90	77	82	86	82	94	83	83	80	77	77	82	78
11	**50-55**	83	88	93	98	85	86	94	89	102	90	91	84	90	86	87	87
12	**55-60**	91	95	97	102	93	87	101	100	112	96	99	91	98	93	90	93
13	**60-65**	96	102	102	108	97	90	108	106	119	109	108	95	105	98	93	103
14	**65-67**	98	105	103	109	98	92	109	107	123	110	109	97	106	100	95	105
Duração do tempo verde (s)		62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
D_{NI}																	
Saturado?		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Duração do Entreverdes		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Observações																	

Legenda:

Tempo verde = duração do tempo de verde do estágio no ciclo considerado

Saturado? Preencher cada coluna com a letra "**S**", para ciclo saturado ou "**N**", caso contrário.

Figura A6.4: Planilha usada na coleta de dados do exemplo

Nesse método os dados da planilha mostrada na Figura A6.4 são inicialmente empregados para a determinação do número de observações por intervalo, mediante o uso da Equação 13, aplicada aos intervalos de cada ciclo, considerados de modo isolado.

Para o Ciclo 1, por exemplo, o número de observações no intervalo 5 é dado por:

$$NVI_5 = NV_5 - NV_4 = 40 - 30 = 10$$

Na Tabela A6.3 são apresentados os valores do número de observações calculados para todos os intervalos dos 16 ciclos observados. São apresentados, também, os valores calculados para o fluxo de saturação (FS), tempo perdido inicial (t_{pin}) e final (t_{pfn}) por ciclo.

Tabela A6.3: Resumos dos valores calculados para os 16 ciclos observados.

Intervalo		Número de veículos por intervalo																Média por intervalo
Ordem	Duração (s)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10	Ciclo 11	Ciclo 12	Ciclo 13	Ciclo 14	Ciclo 15	Ciclo 16	
1	00-05	7	5	7	5	8	5	4	12	10	9	9	4	5	6	7	10	7,1
2	05-10	5	10	12	10	8	16	9	13	10	11	6	9	8	7	11	8	9,6
3	10-15	9	3	5	11	10	6	10	8	6	8	7	11	6	11	10	9	8,1
4	15-20	9	7	8	9	8	5	11	6	10	6	9	9	11	7	10	10	8,4
5	20-25	10	12	12	11	6	9	9	7	9	8	7	8	9	8	12	9	9,1
6	25-30	8	9	11	6	8	8	6	6	11	7	8	6	7	10	8	7	7,9
7	30-35	9	5	6	11	7	6	7	7	9	11	10	9	4	7	7	6	7,6
8	35-40	10	9	8	10	8	10	8	5	8	5	11	7	9	7	6	6	7,9
9	40-45	9	10	7	7	5	8	11	9	11	9	8	10	10	7	6	5	8,3
10	45-50	3	10	8	10	9	9	11	9	10	9	8	7	8	7	5	8	8,2
11	50-55	4	8	9	8	8	4	8	7	8	7	8	4	13	9	5	9	7,4
12	55-60	8	7	4	4	8	1	7	11	10	6	8	7	8	7	3	6	6,6
13	60-65	5	7	5	6	4	3	7	6	7	13	9	4	7	5	3	10	6,3
14	65-67	2	3	1	1	1	2	1	1	4	1	1	2	1	2	2	2	1,7
Total de veículos		98	105	103	109	98	92	109	107	123	110	109	97	106	100	95	105	
FS (veíc./s)		1,53	1,64	1,64	1,76	1,55	1,49	1,76	1,60	1,85	1,58	1,64	1,58	1,69	1,58	1,51	1,51	
t_{pin} (s)		0,42	1,95	0,73	2,16	-0,16	1,64	2,73	-2,50	-0,41	-0,70	-0,49	2,47	2,04	1,2	0,36	-1,62	
t_{pfn} (s)		2,42	0,90	3,34	3,02	3,77	3,64	2,45	2,63	1,05	-1,86	0,90	3,20	2,27	2,57	3,69	-0,95	

O fluxo de saturação, expresso em veículos por segundo, é determinado pela Equação 14, enquanto os tempos perdidos inicial e final são calculados pelas Equações 16 e 17, respectivamente.

Para todos os ciclos considerados, observa-se que:

NIS = 11 (os intervalos de 2 a 12);

NUS = 12;

PIEV = 13 (número do primeiro intervalo que contém tempo de entreverdes);

UIEV = 14 (número do último intervalo que contém tempo de entreverdes).

A título de exemplo, são apresentados a seguir os cálculos efetuados para os Ciclos 1 e 2.

Ciclo 1

$$FS_1 = \frac{\sum_{j=2}^{12} NVI_j}{5 \times 11} = \frac{5+9+9+10+8+9+10+9+3+4+8}{55} = \frac{84}{55} = 1{,}53 \ veíc./s$$

$$t_{pin_1} = 5 - \frac{NVI_1}{FS_1} = 5 - \frac{7}{1{,}53} = 0{,}42 \ s$$

$$t_{pfn_1} = \sum_{j=13}^{14} DIEV_j - \frac{\sum_{j=13}^{14} NVI_j}{FS_1} = 7 - \frac{5+2}{1{,}53} = 2{,}42 \ s$$

Ciclo 2

$$FS_2 = \frac{\sum_{j=2}^{12} NVI_j}{5 \times 11} = \frac{10+3+7+12+9+5+9+10+10+8+7}{55} = \frac{90}{55} = 1{,}64 \ veíc./s$$

$$t_{pin_2} = 5 - \frac{NVI_1}{FS_2} = 5 - \frac{5}{1{,}64} = 1{,}95 \ s$$

$$t_{pfn_2} = \sum_{j=13}^{14} DIEV_j - \frac{\sum_{j=13}^{14} NVI_j}{FS_2} = 7 - \frac{7+3}{1{,}64} = 0{,}90 \ s$$

Fluxo de saturação e tempos perdidos para o grupo de movimentos

Como foram observados ciclos com $t_{pin_i} < 1$ e $t_{pfn_i} < 0$, o técnico encarregado do estudo deve analisar os dados e decidir sobre as observações que serão descartadas para os cálculos.

A seguir apresenta-se uma das possibilidades de tratamento dos dados:

i. o fluxo de saturação é determinado pela média aritmética dos valores obtidos para os 16 ciclos observados;

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{16} FS_i}{16} = \frac{1{,}53+1{,}64+1{,}64+1{,}76+1{,}55+1{,}49+1{,}76+1{,}60+1{,}85+1{,}58+1{,}64+1{,}58+1{,}69+1{,}58+1{,}51+1{,}51}{16} = \frac{25{,}91}{16} = 1{,}62\ veíc./s$$

ii. para o cálculo do t_{pin}, os ciclos com $t_{pin_i} < 1$ não são considerados. Assim, o número de observações fica reduzido a 7;

$$t_{pin} = \frac{\sum_{i=1}^{7} t_{pin_i}}{7} = \frac{1{,}95+2{,}16+1{,}64+2{,}73+2{,}47+2{,}04+1{,}2}{7} = \frac{14{,}19}{7} = 2{,}03\,s$$

iii. no caso do cálculo do t_{pfn}, são excluídas as observações em que $t_{pfn_i} < 0$, e o número de observações consideradas é igual a 14.

$$t_{pfn} = \frac{\sum_{i=1}^{14} t_{pfn_i}}{14} = \frac{2{,}42+0{,}90+3{,}34+3{,}02+3{,}77+3{,}64+2{,}45+2{,}63+1{,}05+0{,}90+3{,}20+2{,}27+2{,}57+3{,}69}{14} = \frac{35{,}85}{14} = 2{,}56\,s$$

De acordo com o tratamento executado, o fluxo de saturação em veículos por hora, calculado pelo produto de FS por 3600, é igual a 5.832. Em resumo:

- ✓ FS = 5.832 vph
- ✓ t_{pin} = 2,03 s
- ✓ t_{pfn} = 2,56 s

O técnico responsável pelo estudo poderia adotar outro tratamento, como por exemplo, descartar alguns ciclos integralmente.

A partir da estratégia adotada, o técnico deverá verificar se é necessário retornar a campo para coletar dados adicionais. Para tanto, deverá adotar o procedimento indicado no item A6.2.1.

Desenho do histograma de tráfego

No exemplo, o último intervalo tem duração de 2 segundos. Assim, para o desenho do histograma, sua altura deve ser ajustada de acordo com a Equação 15. Desse modo, o escoamento do tráfego nesse intervalo pode ser visualmente comparado com o ocorrido nos demais intervalos. A Figura A6.5 mostra o histograma elaborado com o número médio de veículos por intervalo, que estão apresentados na Tabela A6.2.1.

$$A_{NI} = \frac{MI_{NI}}{D_{NI}} \times 5 = \frac{1,7}{2} \times 5 = 4,2$$

Número de Veículos

Intervalos de 5s

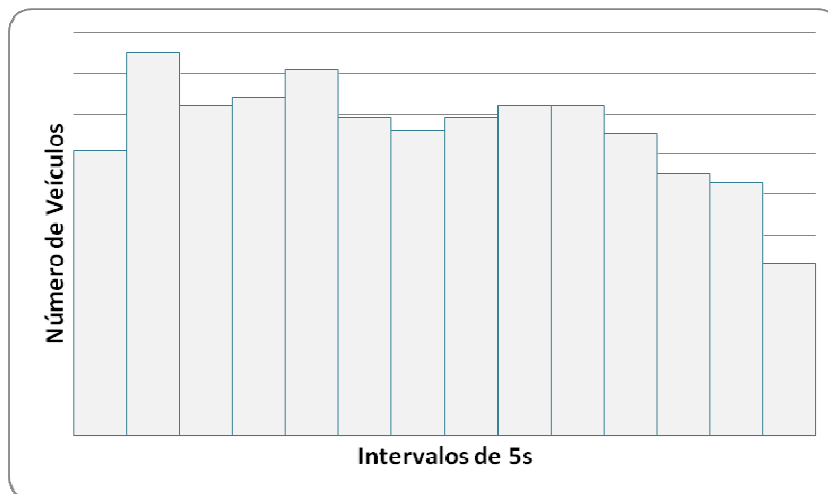



Figura A6.5 : Histograma de tráfego para a aproximação estudada

A6.2 – ANÁLISE E TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os valores calculados para o FS, t_{pin} e t_{pfn}, baseados nas coletas de campo, devem ser avaliados para verificar, primeiramente, se representam as condições gerais do local estudado. Para tanto, deve ser adotado o procedimento descrito na seção A6.2.1, que permite a determinação do número mínimo de ciclos a ser observado para que os resultados sejam estatisticamente significativos (para um nível de significância desejado).

Para analisar como os valores médios obtidos em campo representam os correspondentes valores reais do local estudado, para um nível de significância desejado, a determinação do intervalo de confiança para FS, t_{pin} e t_{pfn} deve ser realizada mediante o procedimento descrito na seção A6.2.2.

A6.2.1 - Determinação do número de ciclos a ser observado

Para a determinação do número de ciclos a ser observado deverá ser realizado um estudo piloto, de acordo com o seguinte procedimento:

- ✓ para cada faixa (ou grupo de movimentos) selecionada, realizar a coleta de dados em, pelo menos, 12 ciclos saturados. O número de ciclos observados corresponde ao tamanho da amostra piloto(n');

- ✓ para cada ciclo calcular FS, t_{pin} e t_{pfn};

- ✓ determinar o valor médio de FS, t_{pin} e t_{pfn} para cada faixa (ou grupo de movimentos), juntamente com os respectivos desvios padrões (ver Equações 18 e 19).

$$MVar = \frac{\sum_{i=1}^{n'} Var_i}{n'} \tag{18}$$

$$SVar = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n'} (Var_i - MVar)^2}{n'-1}} \tag{19}$$

sendo:

Var_i = i-ésimo valor observado da variável considerada;

n' = número de observações da variável considerada:

MVar = valor médio da variável considerada;

SVar = desvio-padrão para a variável considerada.

O tamanho da amostra de ciclos a ser adotada na realização da pesquisa de campo, levando em conta os resultados do estudo piloto é definido pelas Equações 20 e 21. A Equação 20 deve ser empregada para cada uma das variáveis de interesse do estudo (FS, t_{pin} e t_{pfn}).

O maior valor da amostra obtido para as variáveis de interesse (Equação 21) deve ser selecionado como o número de ciclos a ser observado. Esse valor deve incluir, no mínimo, um número de ciclos saturados iguais a $\boldsymbol{nt_{pfn}}$.

$$nVar = \left(t_{n'-1,\alpha/2}\right)^2 \times \frac{SVar^2}{E^2} \tag{20}$$

$$n = Máximo(nS, nt_{pin}, nt_{pfn}) \tag{21}$$

sendo:

nVar = número de ciclos a ser observado para determinação da variável considerada (nFS, nt_{pin}, nt_{pfn});

SVar = desvio-padrão para a variável considerada;

E = erro de estimação admissível (expresso na unidade da variável estudada); sua definição depende dos recursos disponíveis, da experiência do técnico e do objetivo do projeto;

n' = número de ciclos observado no estudo piloto;

α = nível de significância desejado para a estimativa;

$t_{n'-1, \alpha/2}$ = valor da distribuição de *Student* para (n'-1) graus de liberdade e nível de significância "α" (ver Tabela A6.7);

n = número de ciclos a ser observado na faixa considerada (ou para o grupo de movimentos considerado), para a determinação de todas as variáveis do estudo.

Para a faixa (ou grupo de movimentos) do estudo piloto:

- ✓ se n≤ n' , e o número de ciclos saturados em n' atender a necessidade do estudo, a amostra piloto já é suficiente para a estimação;
- ✓ se n> n', ou o número de ciclos saturados em n' não atender a necessidade do estudo, deve-se observar um número adicional de ciclos para complementar o tamanho mínimo da amostra.

a) Exemplo de aplicação para o exemplo do Método 1

Considerando que os 15 ciclos observados compõem uma amostra piloto, a verificação do tamanho da amostra requer, inicialmente, a determinação do desvio-padrão das variáveis fluxo de saturação (FS), tempo perdido inicial (t_{pin}) e tempo perdido final (t_{pfn}).

É importante lembrar que para o cálculo do t_{pfn}, o número de ciclos considerados foi igual a 12, já que dos 15 ciclos dois não eram saturados e em um ciclo houve infração à sinalização semafórica.

A Tabela A6.4 reúne os dados necessários à determinação do tamanho da amostra, onde a média e o desvio padrão de cada variável foram determinados pelas Equações 18 e 19, respectivamente. Os valores do erro admissível para cada uma das variáveis consideradas foram arbitrados, levando em conta variações em torno do valor médio obtido na amostra piloto, dentro de intervalos aceitáveis para este tipo de estudo. Destaca-se que quanto menor o erro admissível maior o tamanho da amostra.

Tabela A6.4: Dados para o cálculo do tamanho da amostra (n)

VARIÁVEL	N'	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	ERRO ADMISSÍVEL
Fluxo de saturação (vph)	15	1840	116,35	80
t_{pin} (s)	15	1,58	0,43	0,3
t_{pfn} (s)	12	1,82	0,47	0,3

Para um nível de significância (α) de 5%, o tamanho da amostra para cada variαvel ι definido pela Equaηγο 28. Assim:

$$nFS = \left(t_{14;0,025}\right)^2 \times \frac{116,35^2}{80^2} = 2,145^2 \times \frac{116,35^2}{80^2} = 9,73 \Rightarrow 10\, ciclos$$

$$nt_{pin} = \left(t_{14;0,025}\right)^2 \times \frac{0,43^2}{0,3^2} = 2,145^2 \times \frac{0,43^2}{0,3^2} = 9,45 \Rightarrow 10\, ciclos$$

$$nt_{pfn} = (t_{11;0,025})^2 \times \frac{0,47^2}{0,3^2} = 2,201^2 \times \frac{0,47^2}{0,3^2} = 11,89 \Rightarrow 12\ ciclos$$

Como para todas as variáveis o valor de n < n', pode-se concluir que a amostra do estudo piloto é suficiente para produzir uma estimativa com erro menor ou igual ao erro admissível especificado, para α = 5%.

b) Exemplo de aplicação para o exemplo do Método 2

Os dados necessários à determinação do tamanho da amostra para o estudo descrito no exemplo do Método 2 são apresentados na Tabela A6.5. A média e o desvio padrão de cada variável foram determinados pelas Equações 26 e 27, respectivamente.

Tabela A6.5: Dados para o cálculo do tamanho da amostra (n)

VARIÁVEL	N'	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	ERRO ADMISSÍVEL
Fluxo de saturação (vph)	16	5832	360	250
t_{pin} (s)	7	2,03	0,51	0,4
t_{pfn} (s)	14	2,56	1,00	0,5

Para um nível de significância (α) de 5%, o tamanho da amostra para cada variável é definido pela Equação 28. Assim:

$$nFS = (t_{15;0,025})^2 \times \frac{360^2}{250^2} = 2,131^2 \times \frac{360^2}{250^2} = 9,42 \Rightarrow 10\ ciclos$$

$$nt_{pin} = (t_{6;0,025})^2 \times \frac{0,51^2}{0,4^2} = 2,447^2 \times \frac{0,51^2}{0,4^2} = 9,73 \Rightarrow 10\ ciclos$$

$$nt_{pfn} = (t_{13;0,025})^2 \times \frac{1,00^2}{0,5^2} = 2,160^2 \times \frac{1,00^2}{0,5^2} = 18,66 \Rightarrow 19\ ciclos$$

Os resultados mostram que, para o nível de significância especificado, a amostra que assegurará estimativas com erros iguais ou inferiores aos erros admissíveis deve ser formada por 19 ciclos saturados.

Na Tabela A6.6 são apresentados diferentes valores para o tamanho da amostra, calculados com base nos dados de n', média e desvio-padrão mostrados na Tabela A.6.5 para diferentes valores do erro admissível.

Tabela A6.6: Análise de sensibilidade do tamanho da amostra com relação ao erro admissível e ao nível de significância

VARIÁVEL	**ERRO ADMISSÍVEL**	**TAMANHO DA AMOSTRA (N)**	
		Para α =5%	**Para α =10%**
FS (vph) Média = 5832 DP = 360 n' = 16	80	92	63
	100	59	41
	120	41	28
	140	31	21
	160	23	16
	180	19	13
t_{pin} (s) Média = 2,03 DP = 0,51 n' = 7	0,3	18	13
	0,4	10	06
	0,5	07	04
t_{pfn} (s) Média = 2,56 DP = 1,00 n' = 14	0,3	52	36
	0,4	30	21
	0,5	19	13

Os cálculos foram realizados com o uso da Equação 20, e com os valores da estatística "**t** " mostrados na Tabela A6.7.

Por meio dos dados da Tabela A6.6, verifica-se que o tamanho da amostra piloto para as diferentes variáveis garantem, para o nível de significância de 10%, um erro inferior a: 160 vph para o fluxo de saturação; 0,4 s para o tempo perdido inicial; e 05 s para o tempo perdido final.

A.6.2.2 - Estimativa por intervalo

Em muitos casos, pode ser interessante, além de estimar o valor pontual das variáveis FS, t_{pin} e t_{pfn} (estimativa por ponto), realizar a estimativa do intervalo onde o valor médio populacional da variável está inserido, com um nível de significância especificado pelo técnico para essa estimativa.

O intervalo de confiança é obtido pela Equação 22, e sua semi-amplitude (e_o) é calculada pela Equação 23.

$$\text{Intervalo de Confiança (IC)} = \text{Valor médio da variável} \pm e_o \qquad (22)$$

$$e_o = t_{n-1,\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \qquad (23)$$

sendo:

$t_{n'-1,\ \alpha/2}$ = valor da distribuição de Student para (n'-1) graus de liberdade e nível de significância "α (ver Tabela A6.7)

n = número de elementos da amostra;

S = desvio-padrão amostral.

A semi-amplitude do intervalo de confiança ("e_o") corresponde ao erro da estimativa "E" (ver Equação 20).

Tabela A6.7: Valores de $t_{n'-1,\, \alpha/2}$

Grau de liberdade (n'-1)	$t_{n'-1,\, \alpha/2}$ para nível de significância - α (%)	
	α = 5% (α /2=2,5%)	α = 10% (α /2=5,0%)
4	2,776	2,132
5	2,571	2,015
6	2,447	1,943
7	2,365	1,895
8	2,306	1,860
9	2,262	1,833
10	2,228	1,812
11	2,201	1,796
12	2,179	1,782
13	2,160	1,771
14	2,145	1,761
15	2,131	1,753
16	2,120	1,746
17	2,110	1,740
18	2,101	1,734
19	2,093	1,729
20	2,086	1,725
21	2,080	1,721
22	2,074	1,717
23	2,069	1,714
24	2,064	1,711
25	2,060	1,708
26	2,056	1,706
27	2,052	1,703
28	2,048	1,701
29	2,045	1,699
30	2,042	1,697
∞	1,960	1,645

a) Estimativa por intervalo para os resultados do exemplo do Método 1

Neste caso, a estimativa será feita para um nível de significância igual a 5%.

a.1) Estimativa por intervalo do fluxo de saturação

n = 15

FS = 1840 vph

S = 116,35 vph

$t_{14;0,025}$ = 2,145

$$e_o = t_{n-1,\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} = 2,145 \times \frac{116,35}{\sqrt{15}} = 64,44\ vph$$

Com o uso da Equação 23, o intervalo para a estimativa do fluxo de saturação é igual a:

$$\text{Fluxo de saturação (IC)} = 1840 \pm 64,44 = [1775,56;\ 1904,44]$$

a.2) Estimativa por intervalo do tempo perdido inicial

n = 15

t_{pin} = 1,58 vph

S = 0,43 vph

$t_{14;0,025}$ = 2,145

$$e_o = t_{n-1,\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} = 2,145 \times \frac{0,43}{\sqrt{15}} = 0,24\ s$$

Com o uso da Equação 23, o intervalo para a estimativa do tempo perdido inicial é igual a:

$$t_{pin}\ (\text{IC}) = 1,58 \pm 0,24 = [1,34;\ 1,82]$$

a.3) Estimativa por intervalo do tempo perdido final

n = 12

t_{pfn} = 1,82 vph

S = 0,47 vph

$t_{11;0,025}$ = 2,201

$$e_o = t_{n-1,\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} = 2,201 \times \frac{0,47}{\sqrt{12}} = 0,30\ s$$

Com o uso da Equação 23, o intervalo para a estimativa do tempo perdido final é igual a:

$$t_{pfn}\ (IC) = 1{,}82 \pm 0{,}30 = [1{,}52;\ 2{,}12]$$

b) Estimativa por intervalo para os resultados do exemplo do Método 2

Neste caso, a estimativa será feita para um nível de significância igual a 10%, com base nos resultados da aplicação do Método 2.

b.1) Estimativa por intervalo do fluxo de saturação

n = 16

FS = 5832 vph

S = 360 vph

$t_{15;0,05}$ = 1,753

$$e_o = t_{n-1,\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} = 1{,}753 \times \frac{360}{\sqrt{16}} = 157{,}77\ vph$$

Com o uso da Equação 23, o intervalo para a estimativa do fluxo de saturação é igual a:

$$\text{Fluxo de saturação (IC)} = 5832 \pm 157{,}77 = [5674{,}23;\ 5989{,}77]$$

b.2) Estimativa por intervalo do tempo perdido inicial

n = 7

t_{pin} = 2,03 vph

S = 0,51 vph

$t_{6;0,05}$ = 1,943

$$e_o = t_{n-1,\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} = 1{,}943 \times \frac{0{,}51}{\sqrt{7}} = 0{,}37\ s$$

Com o uso da Equação 23, o intervalo para a estimativa do tempo perdido inicial é igual a:

$$t_{pin}\ (IC) = 2{,}03 \pm 0{,}37 = [1{,}66;\ 2{,}40]$$

b.3) Estimativa por intervalo do tempo perdido final

n = 14

t_{pfn} = 2,56 vph

S = 1,00 vph

$t_{13;0,05}$ = 1,771

$$e_o = t_{n-1,\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} = 1{,}771 \times \frac{1{,}00}{\sqrt{14}} = 0{,}47 \ \ s$$

Com o uso da Equação 23, o intervalo para a estimativa do tempo perdido final é igual a:

$$t_{pfn} \text{ (IC)} = 2{,}56 \pm 0{,}47 = [2{,}09; \ 3{,}03]$$

A6.3 – MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DO FLUXO DE SATURAÇÃO

Para projeto de implantação de nova sinalização semafórica, o fluxo de saturação, em geral, precisa ser estimado.

Na literatura técnica internacional e nacional são apresentados diferentes métodos para estimativa do fluxo de saturação. Dentre estes o projetista deverá selecionar aquele que mais se ajusta à situação em estudo. **Deve** levar em conta, também, os pressupostos básicos adotados no desenvolvimento de cada método e as condições gerais dos locais onde os dados necessários a esse desenvolvimento foram coletados.

Um método amplamente empregado internacionalmente para essa estimativa é o do *Highway Capacity Manual* (HCM), publicado nos Estados Unidos pelo *Transportation Research Board* (TRB). Desde sua primeira edição em 1950, o HCM vem sendo aperfeiçoado mediante a incorporação do resultado de estudos realizados tanto nos Estados Unidos quanto em diferentes países. A versão mais recente do manual foi publicada em 2010, mas, neste manual foi utilizada a versão publicada em 2000 (TRB, 2000), sendo esse documento usualmente referido como **HCM 2000**.

O método básico do HCM 2000 é apresentado neste apêndice.

A6.3.1 Expressão geral

O método permite a estimativa do fluxo de saturação para um determinado número de faixas de trânsito mediante a utilização da Equação 24. Nessa expressão, um fluxo básico por faixa, expresso em ucp/h, é ajustado por fatores que refletem as condições gerais das faixas de trânsito a serem analisadas em conjunto.

Para cada grupo de movimentos a ser controlado pela sinalização semafórica **deve-se**, portanto, definir inicialmente o número de faixas de trânsito da aproximação que será utilizada pelo grupo.

$$s = s_o \times N \times f_w \times f_{HV} \times f_g \times f_p \times f_{bb} \times f_a \times f_{LU} \times f_{LT} \times f_{RT} \times f_{Lpb} \times f_{Rpb} \qquad (24)$$

sendo:

s = fluxo de saturação para o conjunto de faixas, expresso em vph;

s_o = fluxo de saturação básico por faixa, expresso em ucp/h;

N = número de faixas no conjunto de faixas;

f_w = fator de ajuste para largura da faixa;

f_{HP} = fator de ajuste para presença de veículos pesados;

f_g = fator de ajuste para o greide da aproximação;

f_p = fator de ajuste para presença/atividade de estacionamento;

f_{bb} = fator de ajuste para parada de ônibus junto à interseção;

f_a = fator de ajuste para tipo de área onde a interseção se localiza;

f_{LU} = fator de ajuste para utilização de faixa de trânsito;

f_{LT} = fator de ajuste para conversões à esquerda;

f_{RT} = fator de ajuste para conversões à direita;

f_{Lpb} = fator de ajuste para o impacto da presença de pedestres/ciclistas sobre conversões à esquerda;

f_{Rpb} = fator de ajuste para o impacto da presença de pedestres/ciclistas sobre conversões à direita.

A6.3.2 Fluxo de saturação básico

O HCM 2000 recomenda a adoção de um fluxo de saturação básico (s_o) igual a 1900 ucp/h por faixa. Assim, o fluxo de saturação básico para o conjunto considerado de faixas de trânsito é obtido pela multiplicação desse valor pelo número de faixas do conjunto (N).

A6.3.3 Fatores de ajuste

Fator de ajuste para largura da faixa (f_w)

Este fator é determinado pela Equação 25, para largura de faixas maior ou igual a 2,4m. Em situações onde uma faixa tiver largura superior a 4,8m, o HCM 2000 recomenda tratá-la como duas faixas.

$$f_w = 1 + \frac{(W - 3{,}6)}{9} \qquad (25)$$

sendo W a largura da faixa, em metros.

Fator de ajuste para presença de veículos pesados (f_{HV})

Este fator é calculado pela Equação 26. O HCM 2000 considera veículo pesado todo veículo com mais de quatro pneus tocando o pavimento, e admite um fator de equivalência global para cada veículo pesado igual a 2,0 ucp.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + HV(E_T - 1)} \tag{26}$$

sendo:

HV = percentagem de veículos pesados no grupo de movimentos que utiliza o conjunto de faixas;

E_T= fator de equivalência para veículos pesados (E_T = 2,0 ucp/veículo pesado);

No caso de se desejar expressar o fluxo de saturação em unidades de carro de passeio (ucp), esse fator não é incluído no cálculo.

Fator de ajuste para o greide da aproximação (f_g)

O HCM 2000 considera que o greide afeta tanto o comportamento dos carros de passeio quanto dos veículos pesados. A representação desse impacto é realizada por meio do fator $\mathbf{f_g}$, determinado pela Equação 27.

$$f_g = 1 - \frac{G}{200} \tag{27}$$

Sendo G o greide do conjunto de faixas de trânsito que atende o grupo de movimentos considerado, expresso em percentagem.

Fator de ajuste para presença/atividade de estacionamento (f_p)

Este fator é calculado pela Equação 28, cujos elementos são:

- ✓ N = número de faixas de trânsito do conjunto de faixas que atende o grupo de movimentos considerado;
- ✓ Nm = número de manobras de estacionamento por hora.

$$f_p = \frac{N - 0{,}1 - \frac{18N_m}{3600}}{N} \tag{28}$$

A Equação 28 se aplica quando $0 \leq N_m \leq 180$.

O número de manobras de estacionamento por hora (N_m) deve ser observado na faixa destinada a estacionamento adjacente ao conjunto de faixas analisado, e a uma distância de até 75m a montante da linha de retenção.

No caso de Nm > 180, adotar 180. O valor de f_p deve ser sempre maior ou igual a 0,050. No caso de não haver presença/atividade de estacionamento, adotar f_p igual a 1,00.

Fator de ajuste para parada de ônibus junto à interseção (f_{bb})

Este fator só deve ser calculado para o caso de existir parada de ônibus localizada junto à aproximação (até 75m a montante ou a jusante), a qual bloqueie o tráfego na faixa adjacente à parada durante as operações de embarque/desembarque de passageiros.

No cálculo de f_{bb} por meio da Equação 29, se o número de ônibus que para por hora (N_B) for superior a 250, adotar esse valor como limite superior prático. Também, o valor a adotar para f_{bb} deve ser maior ou igual a 0,05.

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14{,}4 N_B}{3600}}{N} \qquad (29)$$

sendo:

N = número de faixas no conjunto de faixas que serve o grupo de movimentos considerado;

N_B = número de ônibus que para por hora.

Fator de ajuste para tipo de área onde a interseção se localiza (fa)

Esse fator indica que as interseções localizadas nos centros comerciais das áreas urbanas (CBD- *Central Business District*) têm operação menos eficiente do que as localizadas nas demais áreas.

Assim, para interseções localizadas em CBD, f_a é igual a 0,90. Para as interseções situadas nas demais áreas, f_a é igual a 1,00.

Fator de ajuste para utilização de faixa de trânsito (f_{LU})

Este fator procura representar o efeito do uso diferenciado das faixas que atendem ao grupo de movimentos considerado sobre o respectivo fluxo de saturação.

A determinação de f_{LU}, efetuada por meio da Equação 30, considera a taxa de fluxo observado na faixa mais carregada do conjunto de faixas que serve o grupo de movimentos considerado.

$$f_{LU} = \frac{V_g}{(V_{g1} N)} \qquad (30)$$

sendo:

V_g = taxa de fluxo global observado em todas as faixas de trânsito que servem o grupo de movimentos considerado, em veículos por hora;

V_{g1} = taxa de fluxo observada na faixa mais carregada, em veículos por hora;

N = número de faixas de trânsito que atende ao grupo de movimentos considerado

Em locais onde o grupo de movimentos considerado utiliza apenas uma faixa, ou em situações em que a demanda se aproxima da capacidade, pode ser adotado f_{LU}=1,0.

Fator de ajuste para conversões à esquerda (f_{LT})

A determinação do fator f_{LT} depende de vários aspectos, dentre os quais:

- ✓ disponibilidade ou não de faixas exclusivas para a conversão à esquerda;
- ✓ tipo de controle semafórico das conversões à esquerda (protegido, permitido ou protegido mais permitido);
- ✓ proporção dos veículos de uma faixa compartilhada que fazem conversão à esquerda;
- ✓ taxa de fluxo do tráfego oposto, no caso das conversões permitidas mas não protegidas.

O impacto da presença de pedestres e ciclistas sobre as conversões à esquerda é considerado em um fator a parte (ver fator f_{Lpb}).

Para o caso das conversões à esquerda serem protegidas em um dado estágio, o fator de ajuste f_{LT} assume o valor 0,95 no caso dessas conversões ocorrerem em faixas exclusivas. Quando as conversões são realizadas em faixas compartilhadas, f_{LT} é determinado pela Equação 31.

$$f_{LT} = \frac{1}{1 + 0{,}05 P_{LT}} \qquad (31)$$

sendo P_{LT} a proporção de veículos da faixa compartilhada que faz o movimento de conversão à esquerda.

A determinação de f_{LT} para o caso das situações de controle onde as conversões não são protegidas é mais complexa. Nesse caso, recomenda-se a consulta ao Apêndice C do Capítulo 16 do HCM 2000.

Na ausência de conversões à esquerda fLT = 1,0.

Fator de ajuste para conversões à direita (f_{RT})

A determinação desse fator é função do tipo de faixa onde a conversão à direita é realizada. O impacto da presença de pedestres e ciclistas sobre as conversões à direita é representado por um fator de ajuste específico (ver fator f_{Lpb}).

- ***Conversões em faixa exclusiva***

$$f_{RT} = 0{,}85$$

- ***Conversões em faixa compartilhada***

O fator é determinado pela Equação 32, sendo P_{RT} a proporção de veículos da faixa compartilhada que faz o movimento de conversão à direita.

$$f_{RT} = 1 - 0{,}15 P_{RT} \qquad (32)$$

A Equação 32 é aplicada quando a faixa compartilhada é parte integrante de um conjunto de faixas. Quando a faixa compartilhada for a única faixa disponível para o grupo de movimentos considerado, o fator é determinado pela Equação 33.

$$f_{RT} = 1 - 0{,}135 P_{RT} \qquad (33)$$

Em qualquer uma das situações anteriores, o valor adotado para f_{RT} deve ser maior ou igual a 0,05. Esse fator é igual a 1,0 no caso de não ocorrerem conversões à direita no grupo de movimentos considerado.

Fatores de ajuste para o impacto da presença de pedestres/ciclistas sobre conversões à esquerda (f_{Lpb}) e à direita (f_{Rpb})

Estes fatores devem ser calculados no caso dos veículos que recebem indicação verde para realizar o movimento de conversão ter que dar preferência de passagem a pedestres e/ou ciclistas em movimento conflitante, durante todo o verde ou em parte deste.

A determinação desses fatores, necessária somente quando o movimento de conversão veicular não é protegido, é detalhada no Apêndice D do Capítulo 16 do HCM 2000.

Quando os movimentos veiculares de conversão forem protegidos, esses fatores são iguais a 1,0.

BIBLIOGRAFIA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Norma Brasileira ABNT NBR 7995:2004*. Sinalização Semafórica– Grupo focal semafórico em alumínio. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BRASIL. *Código de Trânsito Brasileiro*: instituído pela Lei no 9.503, de 23-09-97 – 1ª Edição. Brasília: DENATRAN, 2008.

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego. *Manual de Sinalização Semafórica* – Critérios de Programação. São Paulo: CET, 2001.

DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito. *Manual de Semáforos*. 2ª Edição. Brasília: DENATRAN, 1984.

FHWA – Federal Highway Administration. *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways* – 2003 Edition. Part 4 – Highway Traffic Signals. Washington, D.C.: FHWA, 2003.

ROESS, R.P.; PRASSAS, E.S.; McSHANE, W.R. *Traffic Engineering*. 3rd Edition. New Jersey: Pearson Prentice-Hall, 2004.

RRL – Road and Research Laboratory. *A Method of Measuring Saturation Flow at Traffic Signals*. Road Note 34. London: RRL, 1963.

TRB – Transportation Research Board (2000). HCM – Highway Capacity Manual. Washington D.C.: NRC

GLOSSÁRIO

Ao longo deste Manual são adotadas as seguintes definições:

Aproximação - trecho de via por onde os veículos chegam à interseção.

Área de conflito - área da interseção onde os movimentos veiculares oriundos das diferentes aproximações podem interferir entre si.

Atraso - diferença entre o tempo gasto por um veículo para percorrer um determinado trecho sob o controle semafórico e o tempo que gastaria se percorresse o mesmo trecho em regime de fluxo ininterrupto, na velocidade desejada.

Capacidade de um grupo de movimentos - número máximo de veículos de um grupo de movimentos que pode passar em uma aproximação controlada por sinalização semafórica durante uma hora, considerando-se a sua operação normal.

Ciclo - sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica.

Controle atuado - tipo de controle de uma sinalização semafórica em que a ocorrência de um ou mais estágios e/ou sua respectiva duração dependem do reconhecimento efetuado por equipamentos detectores de veículos e pedestres que a demandam. Pode ser do tipo semiatuado, quando pelo menos um dos estágios não depende do reconhecimento da demanda dos veículos ou pedestres, ou do tipo totalmente atuado.

Controle em tempo fixo – tipo de controle em que que o tempo de ciclo, a sequência de estágios, a duração dos intervalos luminosos e a defasagem, no caso das redes semafóricas, são mantidos constantes durante determinado período do dia.

Defasagem - intervalo de tempo decorrido entre o início do verde que uma corrente de tráfego que passa por dois locais semaforizados pertencentes à mesma rede recebe nesses locais.

Detector de tráfego - dispositivo que tem a função de detectar a demanda de tráfego (veículos motorizados, não motorizados e pedestres) em determinado local.

Diagrama de barras – sinônimo de "Diagrama de intervalos luminosos".

Diagrama de estágios - representação gráfica da alocação dos movimentos que podem ser realizados (motorizados e não motorizados) em cada estágio do ciclo.

Diagrama de intervalos luminosos - representação da duração e sequência dos intervalos luminosos e estágios por meio de barras horizontais, associando-os aos grupos semafóricos correspondentes.

Entreverdes - intervalo de tempo compreendido entre o final do verde de um estágio e o início do verde do estágio subsequente.

Estágio - intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos recebem simultaneamente o direito de passagem. O estágio compreende o tempo de verde e o tempo de entreverdes que o segue.

Estratégia de controle isolada – estratégia de controle em que uma interseção é controlada independentemente de outras interseções.

Estratégia de controle em rede – estratégia de controle em que duas ou mais interseções são controladas por meio da coordenação de suas programações, formando uma rede.

Fila - número total de veículos aguardando em uma aproximação para transpor um local semaforizado.

Fluxo de Saturação – o fluxo de saturação de um grupo de movimentos corresponde ao número máximo de veículos que poderia passar em uma aproximação controlada por sinalização semafórica no caso dessa aproximação receber indicação verde durante uma hora inteira.

Foco – unidade que fornece indicação luminosa.

Grau de saturação (de um grupo de movimentos) - grandeza obtida pela relação entre o volume do grupo de movimentos e a capacidade para o atendimento desse volume no período de tempo considerado.

Grupo de movimentos - conjunto de movimentos presentes em uma mesma aproximação que recebem simultaneamente o direito de passagem.

Grupo de movimentos crítico de um estágio – grupo de movimentos que apresenta a maior taxa de ocupação dentre aqueles que recebem verde em um determinado estágio.

Grupo focal – sinônimo de "Semáforo".

Grupo semafórico - conjunto de semáforos (grupos focais) com indicações luminosas idênticas que controlam grupos de movimentos que recebem simultaneamente o direito de passagem.

Headway - intervalo de tempo entre a passagem de veículos sucessivos sobre um determinado ponto de uma faixa de trânsito, considerando-se o mesmo elemento físico nos dois veículos (por exemplo, para-choque dianteiro).

Interseção a jusante – tomando como referência uma corrente de tráfego que passa por determinada interseção, denomina-se interseção a jusante uma outra interseção para a qual essa corrente de tráfego se dirige.

Interseção a montante - tomando como referência uma corrente de tráfego que passa por determinada interseção, denomina-se interseção a montante uma outra interseção de onde essa corrente de trânsito provém.

Intervalo luminoso - período de tempo em que permanece inalterada a configuração luminosa dos semáforos (grupos focais) que controlam o tráfego em um determinado local.

Movimento – fluxo de veículos que tem a mesma origem e mesmo destino, e/ou o fluxo de pedestres que se deslocam na mesma direção, mas não necessariamente no mesmo sentido, em uma interseção ou em uma travessia de pedestres de meio de quadra.

Plano semafórico - conjunto de elementos que caracteriza a programação da sinalização semafórica para uma interseção ou seção de via, num determinado período do dia.

Semáforo – elemento componente da sinalização semafórica que fornece informações aos condutores de veículos e aos pedestres através de indicações luminosas.

Sinalização semafórica - subsistema da sinalização viária que se compõe de indicações luminosas acionadas alternada ou intermitentemente por meio de sistema eletromecânico ou eletrônico. Tem a finalidade de transmitir diferentes mensagens aos usuários da via pública, regulamentando o direito de passagem ou advertindo sobre situações especiais nas vias.

Sinalização semafórica de advertência – sinalização semafórica que tem a função de advertir sobre a existência de obstáculo ou situação perigosa, devendo o condutor reduzir a velocidade e adotar as medidas de precaução compatíveis com a segurança para seguir adiante.

Sinalização semafórica de regulamentação – sinalização semafórica que tem a função de efetuar o controle do trânsito numa interseção ou seção de via, através de indicações luminosas, alternando o direito de passagem dos vários fluxos de veículos e/ou pedestres.

Taxa de fluxo - fluxo de movimento é o número de veículos projetado para o período de uma hora a partir dos volumes medidos em uma dada seção de via, durante intervalos de tempo inferiores a uma hora.

Taxa de ocupação – quociente entre o taxa de fluxo e o respectivo fluxo de saturação de um grupo de movimentos.

Tempo de ciclo - tempo necessário para que um ciclo inteiro seja cumprido em uma interseção, ou seção de via; é determinado pela soma dos tempos de todos os estágios programados para o controle do tráfego no local.

Tempo de verde de segurança - valor mínimo admissível para a duração do tempo de verde que atende a um grupo de movimentos.

Tempo de verde efetivo de um estágio - tempo de verde necessário para escoar o fluxo do grupo de movimentos crítico desse estágio, durante um ciclo, considerando-se que o escoamento se dá no fluxo de saturação.

Tempo de verde real de um estágio - duração do período em que o respectivo grupo focal permanece em verde, durante um ciclo.

Tempo Perdido (de um ciclo ou Total) - parte do ciclo que não é efetivamente utilizada pelos veículos.

Travessia crítica – travessia que apresenta maiores dificuldades para os pedestres atravessarem ou travessia na qual o número de pedestres é maior.

Vermelho geral - intervalo de tempo entre o final do amarelo (ou do vermelho intermitente) de um estágio e o início do verde do próximo estágio.

Via principal – via que possui o maior volume de tráfego dentre as vias que formam uma interseção. Cada interseção possui apenas uma via principal.

Via secundária – via que não possui o maior volume de tráfego dentre as vias que formam uma interseção. Cada interseção possui uma ou mais vias secundárias.

Volume de tráfego (ou fluxo de tráfego) - número de veículos ou pedestres que passa por uma dada seção de via durante o período de realização de uma contagem.

Volume de tráfego equivalente - volume de tráfego veicular expresso em termos de unidades de carros de passeio (ucp).